

AN901

dsPIC30F 在无传感器 BLDC 控制中的应用

著者： *Charlie Elliott*
Smart Power Solutions, LLP
合著者： *Steve Bowling*
Microchip Technology Inc.

引言

本应用笔记描述了一种完全可行且高度灵活的软件应用，使用 dsPIC30F 来控制无传感器无刷直流（brushless DC，BLDC）电机。此软件将 dsPIC30F 外设广泛应用于电机控制。所实现的无传感器控制算法特别适用于风扇和泵。程序使用 C 语言编写，经过特别优化，并附有详细的注释以便于理解和程序修改。给定

软件特点

- 采用反电动势过零检测程序，无需使用位置传感元件。
- 应用程序包含可调节参数和两种可选的起动方法以适应特定负载。
- 可检测无传感器算法是否失效。
- 可重新起动无传感器控制而无需停止电机。
- 可控制放电电流以调节 DC 母线电压。
- 换相方案支持随速度增加而线性引入达 30° 的相位超前，进而获得更高的电机效率和更宽的速度范围。
- 四种不同方式来控制电机速度。
- 简单的用户界面，带 LCD 显示，可通过按钮调节超过 40 项参数。
- 软件大约占用 5 MIPS（最大），需要大约 16KB 的程序存储空间。
- 不包含用户界面和调试代码时，应用代码可以装入不到 12 KB 的程序存储器中，可与已设计的最小存储器 dsPIC30F 器件 （dsPIC30F2010）兼容。

已知限制

- 使用时，无传感器系统能可靠工作的最大输出频率大约为 150 Hz。但是，这一限制可以让很常见的 4 极电机的最高运转速度达到 4500 RPM。
- 如果使用相位超前，输出频率最高可达 250 Hz（4 极电机可达 7500 RPM）。通过修改软件，可达到更高速度。
- 支持对角逆变器开关器件的硬调制。
- 系统支持在闭环换相模式下运行，通常风扇和泵都需要这种支持。

背景知识

无刷直流 （BLDC）电机体积小、可控制且效率高，因此在消费和工业应用中得以采用。这种电机还越来越多地被应用于汽车应用中，以避免使用皮带和液压传动系统，并提供更多功能和改善燃料利用率。BLDC 电机控制所需磁性元件和电子元器件成本的不断降低使得无刷直流电机的应用越来越广泛，同时还被用于更高的功率级别。

由于电励磁必须与转子位置同步，BLDC 电机运行时通常带有一个或多个转子位置传感器。由于成本、可靠性以及机械装配等因素，尤其是当转子浸没在液体中运行时，要求电机不带位置传感器运行 （即所谓的无传感器运行）。

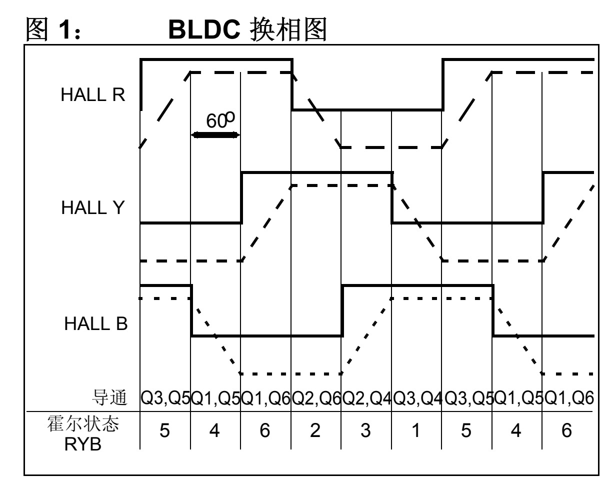
本文假设读者已经熟悉了带有位置传感器的 BLDC 的工作原理，因此不再详细阐述该技术。Microchip 应用笔记 AN857 中对 BLDC 电机控制进行了非常有用的介绍。在参考书目列出的书籍中可以找到其他相关内容。需要注意的是，本文讲述的无传感器方案是 AN857 所述的更高级形式。最后应该指出，本文中所有论述以及应用软件均假定使用三相电机。

BLDC 电机换相的无传感器技术

本文讨论的方法仅适用于标准结构的三相电机（不含搜索线圈或不对称设计）。另外，本文还假定采用常规 120° 通电方式，这样在一些时间段会出现某相上电流为零、不通电的现象。为使电机运行，必须按照周期性间隔切换通电的相（即换相）。

要使电机正确换相，必须测量电周期中的绝对位置。对于常规通电，每个电周期需要六次等距换相。这通常是通过三个霍尔效应开关或光学开关（转子上要有相应的圆盘）实现的。并不需要连续的位置信息，只要检测所需换相情况即可。图 1 给出了三个传感器的输出和每相的相应反电动势（Back EMF， BEMF）电压波形。

图 1： BLDC 换相图



要通过监测电机的某项特性来检测转子位置，显然该特性必须随位置发生变化。此外，理想的情况是该特性能在电周期中建立唯一的位置，这将增强无传感器技术的鲁棒性。相磁通链随位置发生的变化会产生转矩。这种效应可以从磁阻和 BEMF 两方面进行考虑，这两者不但随电流变化，而且随位置变化。BEMF 还随速度线性变化。可以直接监测磁阻或 BEMF 的变化，也可以监测它们对间接量的影响。

磁阻变化方法

如公式 1 的磁欧姆定律所示，磁阻是电阻的磁当量：

公式 1： 磁欧姆定律

$$\Re = \frac{MMF}{\Phi}$$

在此公式中：

$\Re$ = 磁阻

MMF = 磁动势

Φ = 磁通量

磁阻表示磁通流经由钢、气隙和磁体组成的磁路的难易程度。磁体是非常好的磁通源，相当于电流源。相绕组是良好的 MMF 源，相当于电压源。在低磁负载时，钢的磁阻很小，并处于磁不饱和状态。在高磁负载（一般为 >1.5 T）下，钢的磁阻会随磁饱和的开始迅速增加。空气具有非常高的磁阻，它与磁负载无关。磁性材料也有相似的特性。

磁阻随位置而变化，因此可以作为无传感器运行的基础。在所有 BLDC 电机中，磁阻随角度也会发生某些变化。从电机来看，磁阻的变化与电感的变化一样明显。磁阻变化有明显的优点，因为在零速度下可以检测到。但是，需要先了解要控制电机的 L(i,θ) 特性。

不幸的是，对于很多 BLDC 电机，磁阻随位置的变化太小，无法可靠地进行测量。尤其是对于表面安装了磁体的电机，其有效气隙很大，所以此特性在这类电机上表现得尤为明显。因此，磁阻的主要部分是不变的，这使随位置发生的剩余变化很难测量。在专门设计为低转矩脉动的电机中，磁阻变化也会较小，因为变化的磁阻会产生多余的转矩。隐磁或内磁电机的磁阻随角度变化很大，但是它们一般用正弦电压通电，因此这里不再讨论。

BEMF 法

电机的BEMF波形随位置和速度变化。因此不可能在零速度和低速时用 BEMF 检测位置。但是，有很多应用（例如风扇和泵）在低速时不需要位置控制或闭环运行。对于这些应用， BEMF 法就很适合。有很多使用 BEMF 的方法，主要方法可以归纳如下：

- 电机端电压检测
  - 通过直接测量或推算 （开关状态和 DC 母线电压已知）。
- 中点电压检测
  - 只适用于具有特殊 BEMF 特性的 Y 型连接电机。
  - 实际上不需要第 4 根线。使用电阻网络和差分操作，可以重新建立星型连接中心点。
- 母线电流梯度检测
  - 因为换相随转子超前或滞后而发生变化，因此取决于特定母线电流的形状。
  - 无法使用快速母线电流控制。

磁通链变化法

检测磁通链随位置的变化可以有效地综合利用磁阻法和 BEMF 法。公式 2 给出了相电压：

公式 2： BEMF 相电压

$$V_{PH} = iR + (d\Psi)/(dt)$$

此方法对方波或正弦波通电提供了从零速度起动的无缝运行能力。需要使用闭环观测器，以通过所加电压和所测相电流的开环积分来正确确定位置，这需要预先详细了解电机的 ψ(i,θ) 特性和有效处理能力。

所选无传感器技术的实现

具体的实现方法基于检测不通电相的BEMF为零时的情况。除了可选的母线电流检测信号放大以及功率开关门驱动电路外，采用 dsPIC30F 单芯片实现提供所有的控制功能。

选择所谓的 BEMF “过零检测”技术是因为：

- 它适用于多种电机。
- 理论上，Y 型连接和 Δ 型连接的三相电机都可以使用它。某些类别的 Δ 型连接电机可能无法应用这种技术。
- 不需要详细了解电机特性。
- 对电机制造容许公差要求不太严格。
- 它对电压控制或电流控制都有效。

过零检测技术适用于速度接近零时不需要闭环操作的多种应用，它尤其适合在风扇和泵中的应用。

假设速度大于零，则每个电周期中某相的 BEMF 为零的位置只有两个，可以通过图 2 中所示通过过零点时 BEMF 的斜率来区分这些位置。

每一段对应电周期中的一个 60° 部分 （共有六个相等的 60° 部分）。（段的编号完全任意，但要与整个软件中使用的编号匹配。）换相发生在每一段的边界处。因此，需要检测段的边界。BEMF 过零点和需要换相的位置之间有 30° 的偏移，必须对其进行补偿，以确保电机平稳高效运转。

图 2： 过零检测

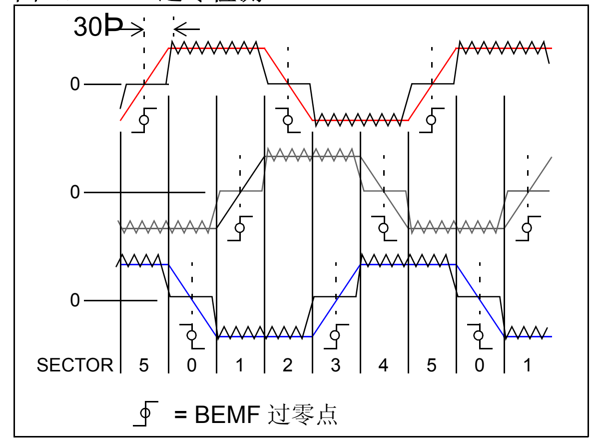
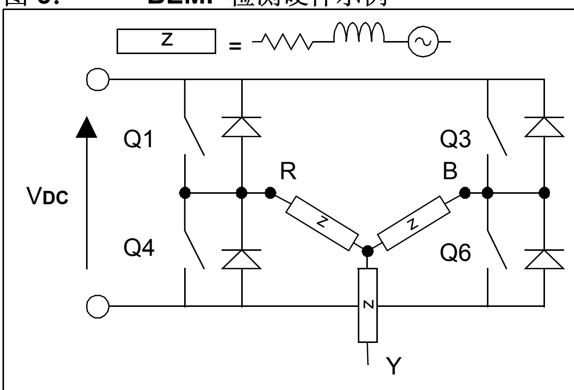


图 2 还给出了理想情况下的各相 BEMF 波形。假定只有三个电机引线可以用于检测 BEMF，则必须确定电机星型连接中心点的电压，因为 BEMF 波形将被该星型连接中心点的电压抵消。

对于 Δ 型连接的电机，操作方法有所不同，将在附录 D 中进行探讨。

前面讲过，在任一时刻只有两相是通电的，且流经这两相的电流方向相反，图 3 说明 Y 相用于 BEMF 检测时的情况。

图 3：　　BEMF 检测硬件示例



当 R 相内流经正向电流（定义为流向星型连接中心点的电流）、B 相内流经负向电流时，Q1 和 Q6 将受到控制，这与前面图（图 2）中的段 1 对应。假设通电相的两端总是对称地分别连接到 DC 电源的两个轨上，则星型连接中心点的电压总是 ½ V_{DC}，与加在这两个通电相绕组上的电压极性无关。但是，只有在每相的 R、L 和 BEMF 都相同，且每相的开关和二极管压降都相等的情况下，星型连接中心点的电压值才为 ½ V_{DC}。假设现在的情况就是这样，因此 BEMF 过零点将被偏置为 ½ V_{DC}，这很容易估计到。

以最简单的形式，BEMF 过零检测方法可以这样实现：

- 通过分压器和 A/D 转换器来监测所有三相的端电压和 V_{DC}。
- 在相应的时间段内检测相 BEMF 何时经过 ½V_{DC}。对于某个特定的时间段，只需监测一相的电压。
- 使用一个可用的定时器测量 60°（即两次过零点之间）的时间。将这个值除以 2，然后加载到另一个定时器中，这样就可以取消正确换相所需的隐含 30° 补偿。

实际上，尽管所测的 BEMF 波形受下面几个次级效应的影响，实际上也不会复杂多少：

- 通电结束时，相绕组去磁会导致其一端被感应并钳位到其中一个 DC 母线电压，因为存储在绕组中的能量会通过反向二极管回流到电源。必须注意，反向二极管的作用不要造成错误的过零点。
- 由于 PWM 作用使得导通相之间产生互耦，导致 “噪声” 被叠加到 BEMF 上。噪声往往会在过零位置处降到最小。
- 星型连接中心点处的电压偏离 ½ VDC。
  - 如果 PWM 周期的某段时间内相电流为零，则通电相的输出端就会变为悬空状态。通常将一个周期中某段时间内相电流为零的这种影响称为不连续电流。
  - 对于大多数系统来说，高端和低端器件之间开关 / 二极管压降的不同，并不会导致明显的问题。对于某些特殊的系统，会导致正向与负向电流区的通电宽度有较小的不平衡。
  - 非梯形的 BEMF 意味着星型连接中心点电压有所偏离，这是因为两个通电相的 BEMF 不相等，幅度一大一小。大部分 BLDC 电机的 BEMF 波形都介于梯形和正弦之间。实际上，这一特性不会引起问题，因为它只会改变所监测 BEMF 在过零点位置的斜率。

在软件中舍弃换相后的最开始几个 BEMF 采样点，很容易避开相绕组的去磁问题。不对 BEMF 波形用硬件进行明显滤波，并且根据PWM波形仔细地选取信号采样点，可排除互耦 PWM “噪声” 和不连续电流问题。在开关关闭之前，使用电机控制 PWM 模块的特殊事件触发器来启动 A/D 信号转换。

应用软件

开发环境采用 MPLAB® 6.40，并用 Microchip C30 optimizing compiler (v1.10.02) 进行编译。采用 MPLAB ICD 2 进行调试和编程。开发所使用的电机为 Hurst Manufacturing NT Dynamo™ 标准产品系列。

大部分代码用 C 编写，为提高效率和增强功能，必要时使用了嵌入汇编器。表 1 描述了这 16 个源代码文件的内容和功能。

硬件资源

如前所述，在启用了编译器 1 级优化时，代码将占用 15,594 字节的程序存储空间。这包括用户界面代码以及存储在程序空间中的一些常量。你可能会想在最终的应用程序中删除用户界面代码。删除用户界面代码后，最小的 dsPIC® 器件也很容易满足应用程序所占用的存储空间。

应用程序需要 276 字节的数据存储器。其余的器件存储空间可用于软件堆栈的动态存储。

如前所述，应用程序会分配两行（64 个程序存储单元）的器件程序存储空间作为软件参数的非易失性存储空间。应用程序中总共有 45 个参数。

该软件是为 7.38 MIPS 速度的 CPU 编写的。在 dsPIC 器件上使用 4X PLL，并使用 7.38 MHz 晶振或外部时钟源，可达到这一运行速度。该软件要求 5 MIPS 的最大执行速度，所以大量的 CPU 带宽可用于其它应用任务。可以通过修改 defs.h 文件中的常量值来修改软件，从而实现在更高的 CPU 速度下运行。

尽管源代码有详尽的注释，但特定于电机控制的主要程序还将在附录 C 的流程图中进行说明。表 2 说明使用了哪些 dsPIC30F 外设及其用途。

表 1： 源代码文件

文件名	文件用途	所包含函数
defs.h	# 定义整个软件中使用的宏值	
extern_globals.h	全局变量的外部声明	
flash_routines.c	用于擦写闪存程序存储器的低级程序	erase_flash_row program_flash
globals.h	全局变量声明	
hardware.h	# 定义特定于 dsPIC30F 电机控制开发 PCB 的宏	
inline_fns.h	头文件，包含可以提高效率的嵌入编译函数，这些函数由 ADC ISR 调用	check_zero_crossing current_control acquire_position
ISRs.c	所有中断服务程序以及所有陷阱服务程序	AddressError StackError MathError PWMInterrupt FLTAInterrupt ADCInterrupt T1Interrupt T2Interrupt T3Interrupt
lcd_drivers.c	访问 2x16 LCD 显示器的低级程序	太多因此无法一一列出各个程序
lcd_messages.h	用于 LCD 显示器上显示消息的字符串常量	
main.c	初始化以及后台代码	main
medium_event.c	中等事件速率处理程序本身和由它调用的所有代码（除了 user_interface 中包含的代码）。中等事件处理程序每 10ms 执行一次。	medium_event_handler speed_loop voltage_control starting_code

表 1： 源代码文件 （续）

文件名	文件用途	所包含函数
parameters.h	所有用户参数缺省值和关于最大值、最小值、递增率以及编辑字符串的细节	
setup.c	在初始化过程中调用的所有外设的设置代码	setup_ports setup_motor_pwms setup_adc setup_qei setup_timers WriteConfig
slow_event.c	只有缓慢事件处理程序。虽然用户界面函数从该处理程序调用，但其代码是独立的。缓慢事件处理程序每 100ms 执行一次。	slow_event_handler
user_interface.c	通过 LCD 显示和按钮开关实现用户界面的各种程序。	screen_handler process_switches save_parameter process_parameters debounce_switches edit_screen uint_to_string nibble_to_hex run_screen
xlcd.h	# 定义供 lcd_drivers 使用的宏	

表 2： **dsPIC30F** 外设的用途

dsPIC30F 外设	**功能和配置**
电机控制 PWM 模块	用对角开关的 16 kHz PWM 调制来驱动三相逆变器。输出配置为独立模式，而且特殊事件触发器用于在开关关闭之前启动 A/D 转换。
高速 10 位 A/D 转换器	用来在每个 PWM 周期中同时对母线电流、母线电压、速度给定和相电压（三相中的一相） 4 个信号进行采样。采样与 PWM 模块同步。
正交编码器接口 （Quadrature Encoder Interface， QEI）	禁止输入，但定时器用于 16 位自由模式，以提供过零检测的时间标记。
TIMER2	用于 16 位模式，以提供过零点事件和期望换相时间之间的延迟。
TIMER3	用来提供放电斩波器开关的 PWM。

硬件

开发出的应用程序要在 dsPICDEM MC1 电机控制开发板以及 dsPICDEM MC1L 三相低电压功率模块或 dsPICDEM MC1H 三相高电压功率模块上运行。控制板或功率模块系统的照片参见图 4。

图 4： 控制板 / 功率模块系统

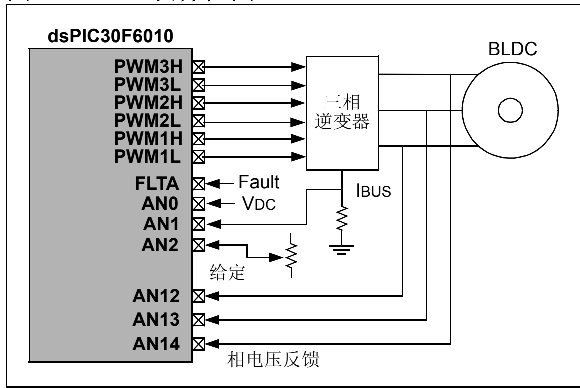


这些开发工具可以从 Microchip 获得（详情请登录 Microchip 网站查询）。或者，你也可以自己设计硬件，但需要对软件做一些更改。

在使用 dsPICDEM 开发工具时，需要对 PCB 上的跳线做一些改动。这些修改可参见 **"对功率模块的改动"** 和 **"对电机控制开发板的改动"**。

下面的框图（图 5）给出了电机控制的简化硬件结构。为清晰起见，这里省略了 LCD 接口和按钮。

图 5： 硬件框图



功率模块包括三相逆变器、母线电流检测电路和电压反馈分压器。

准备

对功率模块的改动

为从功率模块获得所需的反馈信号，必须对其做一些改动。改动要使相电压（x3）、V_{DC} 和母线电流反馈信号反馈至控制板上的 dsPIC30F，这样会使强、弱电之间的隔离失去作用，这一点需要注意。按照以下步骤进行修改：

1. 按照功率模块的用户手册所述去除盖子。
2. 把低阻值电阻（47R 或更低）焊接到 LK22、LK24-26 及 LK30 上。
3. 如果采用的是高压模块，为了在非隔离的模式下修改以及使用系统，请严格遵循其它步骤。这包括在 J5 和 J13 之间焊接一条地线，这条地线上流过的电流值要适当。

注：	为了针对此应用进行修改，必定会使高压功率模块的电气隔离失去作用。务必要保证系统接地，并在主电源和功率模块输入之间采用一个安全隔离变压器。

4. 根据电机的目标用途，设置跳线 LK11-12 的电流反馈比例。跳线 LK11-12 按比例缩小母线电流反馈信号。如果有问题，可以去除 LK11-12，这样可以提供最佳的保护和最高的增益反馈。
5. 如果功率模块工作在低于最大母线电压额定值 50% 的情况下，建议减小电压反馈比例，以获得更高的反馈电压。可通过改变 R10、R13 和 R14 的值来改变 V_{DC} 反馈电压，通过改变 R16- R21 的值来改变 V_{PH} 反馈电压，这些改动是在印刷电路板上方进行的，不需要拆卸功率模块。详情可查阅功率模块的用户手册和原理图。

注：	为获得正确的无传感器操作，相电压和 DC 母线电压的反馈比例必须匹配。

连接电机

应该按照正常的方式连接电机的 3 根引线和地线，引线和地线的规格要根据电流额定值适当选择。无传感器系统的一个优点在于电机引线的相序并不重要，因为它仅定义哪个方向是正向的。如果有合适的位置反馈器件，可将其用于诊断。

对电机控制开发板的改动

为了使应用软件正常工作，必须重新分配控制板上的 ADC 通道，这是因为同时对母线电流（IBUS）、母线电压（VDC）、速度给定（POT）和一相电压（VPH）四个信号进行采样。dsPIC30F 的 10 位 A/D 转换器采用专门的输入引脚进行同时采样。AN0，1，2 分别用于 VDC、IBUS 和 POT 的采样，CH0 MUX 用于在原来为三相电压所分配 AN12，13，14 的 VPH 信号之间切换。需要在 PCB 上完成下列连接以重新分配模拟通道：

- 连接J6的AN11引脚和LK1的引脚2（LK1的其他引脚保持悬空）。
- 连接 J6 的 AN8 引脚和 LK2 的引脚 2（LK2 的其他引脚保持悬空）。
- 连接 J6 的 AN2 引脚和 AN7 引脚。

注：	LK1 和 LK2 用于重新分配 AN0 和 AN1，以确保这些信号和 MPLAB ICD 2 之间没有冲突，MPLAB ICD 2 将这些信号线用作缺省的时钟和数据。

使用 S2 和 MPLAB ICD 2

AN0 和 AN1 用来提供反馈信号，而且 MPLAB ICD 还用它们来进行编程和调试。因此，必须在适当的时候使用 S2 切换到 MPLAB ICD 时钟线和数据线。无论是否调试都需要这样做。如果使用的是 dsPICDEM MC1 电机控制开发板，并准备使用 MPLAB ICD 2 来调试，请完成下列的第 1 至第 3 步。如果准备采用 MPLAB ICD 来进行器件编程，仅仅需要完成第 2 步到第 3 步。

1. 在 MPLAB IDE 中，在 Configure> Configuration Bits>Comm Channel Select 窗口中选择 “Use EMUC1 and EMUD1”选项。
2. 将 S2 调到对应于 MPLAB ICD 这边的位置，对器件编程。
3. 编程完成后，把 S2 改到模拟位置并运行软件。

设置并调整用户参数

用户界面简单直观。LCD 显示屏和按钮开关允许调整许多参数。在可能的情况下会出现帮助字符串。四个按钮的功能如下：

S4	• 在待机或故障状态下激活编辑菜单。 • 在编辑菜单中回滚参数列表。 • 修改参数值时减少值。 • 运行时在两个不同的屏幕间切换。
S5	• 在编辑菜单中向下滚动参数列表。 • 修改参数值时增加值。
S6	• 选择要修改的参数。 • 存储新的参数值。
S7	• 在编辑菜单没有激活的情况下起动/停止/复位系统。 • 从编辑菜单和修改参数状态退出。

大部分参数在其函数中都有说明。源文件 parameters.h 包括参数的补充解释和缺省值，同时还包含各个参数的特性。如果某个语句在引号（""）内，则该语句对应于 LCD 上显示的文本字符串。附录 A 列出了各个参数，并包含一些参数取值的含义。系统上电后为参数 0，并且开始循环访问（从参数 0 移动至最后一个参数）。下面有对起动参数的详细解释。

推荐的设置方法

推荐使用缺省参数，以此作为设置的良好起点。缺省值包含在 parameters.h 文件内，并在**附录 A：“用户参数”**中描述。将系统配置为开环运行，也就是说起动和运行都采用简单的电压控制，这样开始时就不需要调整速度和电压控制环。

建议在开始时忽略与控制环相关的所有参数，集中注意力调整起动参数（参见 **“起动参数”**），以得到可靠的无振荡起动。

一旦系统在无传感器的开环控制模式下运行，你可能希望对控制环和其他系统参数进行一些试验。

硬件参数

在系统起动之前，必须确保与硬件相关的设置参数正确无误。这些参数的设置主要取决于所选择的电机。设置参数包括：

- Number Motor Pole
- Blanking Count
- Voltage Scale
- Current Scale

这些参数的解释可以在附录 A 中找到。

起动参数

由于低速时缺少 BEMF 信息，电机必须开环起动。如果起动参数调整得与电机匹配，给定值不过高或过低，系统应该无传感器运行。如果给定值过高，将会发生过电流。如果给定值过低，系统将不能起动。良好的起点是起动速度为速度给定的 1/2。实现了两种不同的起动方法，同时还要对几个参数进行调整，以根据特定的应用调整起动。控制电机起动的参数如下：

- Direction Demand
- Lock Position 1 Time， Lock Position 2 Time
- Lock Position 1 Time， Lock Position 2 Time
- Ramp Start Speed， Ramp End Speed
- Ramp Start Demand， Ramp End Demand
- Ramp Duration
- Starting Control
- Acquire Method
- ZeroX Enable Speed
- Windmilling Demand
- Braking Ramp Time

首先要确定电机起动和运行的方向。可以通过修改 Direction Demand 参数来改变方向。在项目的最初开发阶段，电机运转方向可能并不是很重要。但是，某些类型的电机及一些负载需要特定的旋转方向。也可以通过交换电机的两根电源线来改变电机运转方向。

起动程序使电机以较低的开环速度运转，随后加速到一个最终值，以产生足够的 BEMF 电压，从而使无传感器算法开始工作。BLDC 电机在开环模式下的运转类似于步进电机，但是这是一个非常低效的运转模式，并且在这种模式下运行时，电机不能产生额定转矩。

设定锁定参数

在电机运转之前，该算法在对两对绕组进行短时间通电后，把转子定位在两个参考或锁定位置。这两个锁定位置可以确保转子在开环起动算法开始运行之前已处于已知的参考点上。开环起动开始前转子的位置稳定是非常重要的，并且必须对这四个 Lock Position 参数进行相应调整。如果 Lock Position Demand 参数设置过高，转子会在到达锁定位置时发生振荡。如果这个参数设置过低，转子将不会移动到参考位置。试着增大或减小 Lock Position Demand 参数，直到转子以最小的振荡迅速移动到两个锁定位置。在设置好给定参数之后，可以增大或减小 Lock Position Time 参数来调整每个锁定位置的保持时间。有些负载的惯性很大（例如大直径的风扇叶片），转子振荡可能需要较长的保持时间才会消失。惯性较小的负载的锁定时间可以设为一个很低的值，这样可以使电机快速起动。配置软件时，试着使用 S7 按钮起动电机，并在锁定时间内观察转子的运转。如果尚未配置其余的参数，可以在锁定时间后按下 S7 按钮，退出电机起动程序。

设定加速参数

在第二个锁定结束时，系统将自动开始以开环步进方式对系统通电。你必须选择加速起动速度 （Ramp Start Speed 参数）以及通电给定，使得转子锁定在通电顺序上。

然后当系统在给定的 “Ramp Duration”时间内加速到 “Ramp End Speed”时，根据两个 Ramp Demand 的值随速度线性改变给定值。开环步进速度介于起动速度和最终速度之间，满足公式 3 给出的时间平方律函数：

公式 3： 时间平方律函数

$$\omega = \omega_S + kt^2$$

其中，ω_S 表示 Ramp Start Speed 参数，k 表示 Ramp End Speed 参数减去 Ramp Start Speed 参数得到的值，t 表示由 Ramp Duration 参数决定的时间。

通过选择加速方式来优化起动性能。加速结束时的速度必须足够高，为系统提供足够高的 BEMF 电压，使系统能可靠地检测过零点。

加速参数指南

首先要为加速选择起始和终止速度。这两个速度取决于特定电机的额定速度和 BEMF 电压常量。要确保将电机可靠地加速到某一速度，在此速度下无传感器程序能检测到 BEMF 电压。可使用的经验法则是，将 Ramp Start Speed 参数设置为电机额定速度值的 1/60。Ramp End Speed 参数可以设置为电机额定速度值的 1/6。例如，当电机的额定速度为 3000RPM 时，可将 Ramp Start Speed 设置为 50RPM，而将 Ramp End Speed 设置为 500RPM。

然后，需要设置 Ramp Start Demand 和 Ramp End Demand 参数。如果使用电压控制模式（软件缺省设置），起始值在 50% 左右通常是合适的。设置这些给定量的关键是，要在没有 “滑转” 或过多机械振动的情况下将电机加速到最终速度。设置这些给定量最好的方法是，在起动时观测转子，在给电机通电时监听其发出的声音。在执行起动程序时，大多数电机会发出滴滴答答的噪音，噪音的频率与加速的速度成比例。如果听到加速的速度在增加，但是转子转速减慢或者只在某个固定位置振动，就可能要增加加速给定量。如果转子看起来加速适当，但在加速期间似乎出现过多的电机振动、过电流或噪音过大，则加速给定量可能被设置得过高。在大多数情况下，需要将 Ramp End Demand 参数设置得比 Ramp Start Demand 参数高出 5% 到 15%。如果这两个参数相等，可以观察到电机开始加速时正常，但是当加速的速度增加时电机开始滑转。

可调整 Ramp Duration 参数以优化起动时间。一般情况下，应使用相对较长的加速时间起动，以确保电机正常起动。2 到 4 秒间的加速时间可适用于大多数电机和负载组合。你会发现，惯性较大的负载需要较长的加速时间达到适当的加速。当缩短加速时间时，也要增加 Ramp Start Demand 和 Ramp End Demand 参数，以避免转子在起动时滑转。

设置起动控制

通过 Starting Control 参数（#40）选择电流控制或电压控制。

电流控制有利于消除由 DC 母线电压变化或电机阻抗引起的起动电流变化。然而相对于电压控制，电流控制的保持时间通常要延长，因为转子振动比电压控制时明显。电流控制的 PID 环也需要调整。

如果使用电流控制，应当输入适当的过电流翻转电平，因为它按比例修正给定量。要确保输入正确的电流反馈比例（如何选取恰当的值请参见 parameters.h）。

采用电压控制（缺省设置）方法，不能检测母线电流，且不能使用针对某些应用的相关软件。只有在很清楚 DC 母线电压的变化并且负载转矩可重复时，才能使用电压控制方法。否则起动可能失败。

两种不同的采集方法

两种不同的采集方法，在本文和所有源代码中称为 “方法 1” 和 “方法 2”，在无传感器运行之前，使用这两种方法采集初始位置。通过 Acquire Method 参数（#43）来选择使用哪种方法。要根据具体的应用来选择适合的方法。

方法 1

采用此方法时，一旦电机速度超过了 ZeroX Enable Speed 参数（#44），系统就开始查询过零点。如果在电周期的两个连续段中检测到了过零点，就会起动无传感器换相。应将 ZeroX Enable Speed 参数设置为某一速度，此速度要高于可观测到平滑运转和产生足够反电动势时的速度。调整起动参数时，用示波器监测一相或多相电压，可以很好地确定此参数。通过 J6 连接器的 AN12、AN13 和 AN14 信号，可很好地观测到相电压。为了使此方法能正常工作，ZeroX Enable Speed 参数必须低于 Ramp End Speed 参数。

当以开环步进方式通电，电机以恒定速度运转时，假定可忽略负载扭矩，转子位置比无传感器控制下运转时的位置大约超前 90°（电角度）。所以，BEMF 过零点发生在某相通电时，而不是不通电区，因此无法检测到过零点。为了能检测到过零点，必须以某一速率使电机加速。加速期间，电机和负载的惯性会引起位置上的滞后，这样就消除了某些或所有自然的相位超前。加速速率越高，滞后越严重。这样，通过选择正确的起动参数和相对可预测的机械负载，在某相不通电期间会出现 BEMF 过零点并能被检测到，使系统起动。

由于方法 1 能提供快速且无缝的起动，因此对于许多应用都可以选择这种采集方法。然而，为了使此方法能正确工作，必须慎重选择控制加速的起动参数。如果机械负载变化或不可重复，则可能导致采集失败。

方法 2

当加速时，方法2并不查询过零点。而是当加速结束时，电机暂时断电。此时，三相电压均可检测到。当相电压升高到零伏以上时，相电压当前值和前后值可用来确定旋转方向和位置。当需要两个不同的相电压上升沿时，系统采集最多需要一个旋转电周期。采集完后，系统重新通电，并以无传感器换相运行。所以此方法的优点是，不需要对电机和负载有很深入的了解。只需要有足够的反电动势和惯性，以确保在采集时电机不停转。而且，在加速结束前，不应有过多的速度振荡。这种采集方法用来提供快速起动检测（系统一起动就发生明显的旋转）和风力旋转检测 （参见表 3）。

表 3： 采集方法的比较

方法 1	方法 2
优点	
• 快速起动 • 电机无停转风险	• 参数调整简便 • 可用于机械负载无法预测情况
缺点	
• 需要认真调整参数 • 需要可预测的负载	• 需要相当大的惯性或低负载且在适当的速度下运行，以避免停转

风力旋转

在风扇应用中，由于周围气流的作用，当电机断电时，风扇的叶片常会旋转，这种现象被称作风力旋转。为了提供稳定的起动，开始时要对速度和方向进行检测。如果电机已经旋转，并且旋转方向和给定方向一致，则可使用方法 2 实现快速起动。

如果电机正在旋转，并且旋转方向和给定方向相反，则必须使电机减速直到停止。可使用正常的起动方法，以希望的方向起动电机。这可通过对电机通电，从旋转检测和降速期间检测到的速度开环起动来实现。达到 0 Hz 所需的时间由 Braking Ramp T 参数控制，以 10 ms 为增量进行设置。 Windmilling Dem 参数设置风力旋转减速期间使用的给定百分比。应该调整这两个参数，以确保系统在制动时锁定。

起动参数检查修正

如果所选的参数设置不能使系统正确起动，则按照下面建议的顺序进行调整：

锁定参数

首先，要确保初始定位正确。延长两次锁定的时间来观测锁定时的运动。在电机确实可以正确响应后，将锁定时间减至可接受的值。有时电机会在第一次锁定要求的位置停止，这意味着在第一次锁定时没有观测到任何运动。然而，相电压的检测将确保仍然正确通电。

通常，系统起动负载较小时，例如大多数风机，需要低的速度给定起动转子。因为这种负载也可能阻尼较小，因此速度给定太高可能引起不希望的振荡。而对于起动负载较大的系统 （例如某些水泵），则需要较高的速度给定来起动转子。幸运的是，这些负载通常阻尼较大。某些具有高传动转矩或惯性的复杂负载可能需要较高的速度给定起动和较长的锁定步骤时间，很适合于采用这种无传感器控制。。

Ramp Start Demand 和 Speed 参数

第二次锁定后，系统立即开始以预定的初始速率使电机步进运转。转子必须与通电顺序同步。如果速度给定太低或者速度太快，转子就可能在这一位置通电失败。相反地，如果速度太慢而速度给定太高，转子可能会在某一位置附近振荡，从而导致同步失败。

在某相未通电期间观测电压反馈信号，可以确定 BEMF 是否有振荡。降低速度给定可能是解决这些不希望位置振动的方案。然而，正如我们将在以下部分所看到的那样，额外的转矩有助于加速。因此要根据加速要求来调整速度给定的初始值。

加速至采集速度

两种采集方法都要求电机具有足够高的速度，使得 BEMF 信息有效。此外对于方法 1 而言，加速本身对于产生使检测方法有效所必需的相移是至关重要的。请看下面的示波器照片，给出了良好和不良加速的例子。

考虑起动参数时，请记住系统依赖于 BEMF 电压信息的成功采集。按照经验法则，已知电机的 BEMF 常量，应该调整相电压反馈电阻网络，以在达到打算采集的速度时能提供大约 100mV 的电压反馈。方法 1 中的采集速度位于 ZeroX Enable Speed 参数和 Ramp End Speed 参数之间。对于方法 2，由 Ramp End Speed 参数给出采集速度。

起动过程中相电压反馈的示波器照片示例

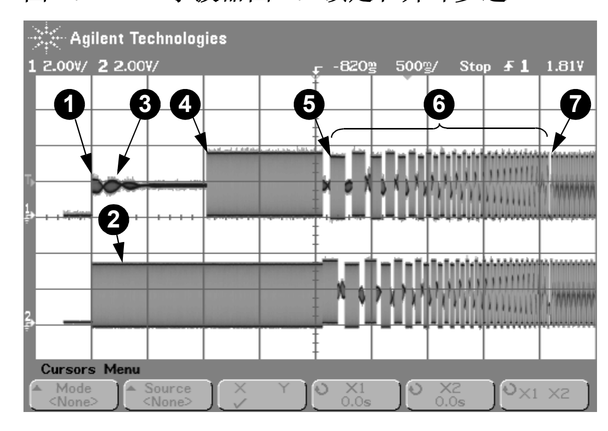
下面的示波器照片显示了下述情况：

- 锁定和开环步进 （参见图 6）
- 正常无传感器运行
- 采集方法 2
- 采集方法 1

在所有照片中，上面的波形为 A 相电压反馈，下面的波形为 B 相电压反馈。未显示 C 相电压。

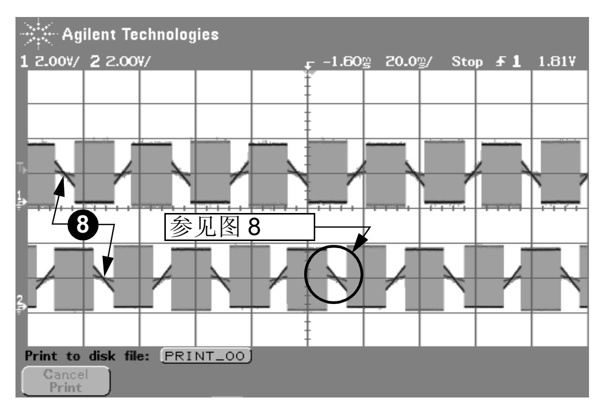
示波器图 1（图 6）显示电机起动时 A 相和 B 相的电压反馈信号。大约 1/2 秒后 （左边沿起第一个时间格）开始第一次锁定 （1）。对 B 相和 C 相通电 （2），在 A 相稳定之前可以看到一些振荡（3）。大约一秒钟之后，第二次锁定发生 （4），此时 A 和 B 被锁定。再过一秒钟之后，系统开始步进 （5），并加速。可以看到一旦系统进入起动程序的步进阶段，就会以 120 电角度通电和 60 电角度断电，并且可以看到通电频率逐渐增加。在最后一个时间区间 （7）中，可以看到一个缺少 2 个通电周期的小间隙，这对应于使用方法 2 时的采集点。

图 6： 示波器图 **1**：锁定和开环步进



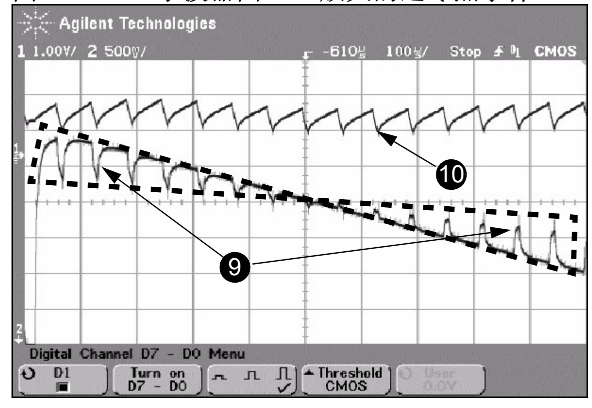
示波器图 2 （图 7）显示在成功采集后，系统在无传感器模式下正常运行。因为通电区间设置正确，所以 BEMF 过零点 （8）始终可见，这与对闭环控制所期望的那样。为了更细致地研究图 1 到图 2 之间的过程，需要分别考虑这两种采集方法。

图 7： 示波器图 **2**：正常无传感器运行



可以忽略不通电区间中 BEMF 波形上的“毛刺”。如图 8 所示，它是叠加在 PWM 频率上的高频 AC 电压。

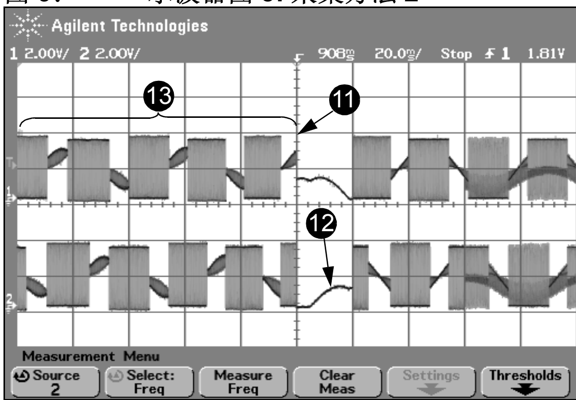
图 8：　　　示波器图 2A: 放大的过零点事件



虚线区内出现的波动（9）是由于电机相间的互耦效应产生的，互耦效应由给电机通电的 PWM 信号引起。互耦值随所用的具体电机型号而有所不同。因为 AD 采样与 PWM 励磁同步，所以系统会忽略这里的 AC 影响。上面的波形（10）显示出应用了 PWM 通电后产生的电机电流，但这不是这次讨论的主题。

示波器图 3（图 9）显示了采集方法 2。图的中心（11）显示出电机的开环步进停止点，在该处采用方法 2 来检测位置。此时， BEMF 不再有通电时通常会看到的 ½ VDC 偏置。系统检测相电压大于 Acquire Threshold 参数（参数 #34）所给定值时的所处的点。可以看到这种情况发生在 B 相上，就在波形中心后（12）。下一个上升沿出现在 C 相（未显示），用来确定方向、速度和位置。然后系统就会转换到常规闭环无传感器运行。

图 9：　　　示波器图 3: 采集方法 2



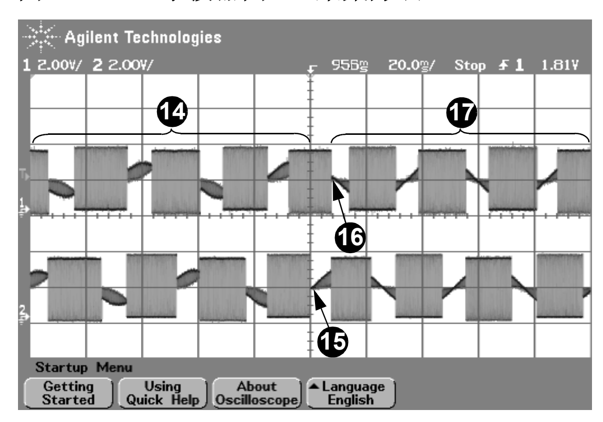
注意，上升到断电点的波形表明，当相不通电时可看到的 BEMF 波形不会显示任何 BEMF 过零点。过零事件被通电隐藏起来。缺少可检测的过零点会导致采集方法 1 失败，但对于采集方法 2 却不存在问题。

要成功使用方法 2，必须设置加速参数，让步进过程中的加速满足下述三个条件。

- 首先，转子的加速度不能高于最高加速度。如果加速度过快，转子失去同步，则增大 Ramp Duration 参数 （参数 #10），减少 Ramp End Speed 参数（参数 #7），或者增加 Ramp End Demand 参数（参数 #9）。
- 第二，BEMF 电压幅值对于 Ramp End Speed 参数（参数 #7）必须足够大。
- 第三，在加速结束时不应该有非常大的转速振荡。振荡过大会导致上升沿检测错误并且检测到的位置不正确。实际位置与检测位置的误差会导致出现触发脉冲的位置不正确，此时出现的严重错误可能引起电机停转。

如示波器图 4（图 10）所示，在左半部分系统运行在开环步进状态 （14）。通电相之间的 BEMF 电压是可见的，但不会显示任何过零点，这是因为相位滞后不够大，不足以显现出过零点。当加速度增加时，相位滞后随时间增加。第一个可见的过零点出现在图中 B 相的中间部分 （15）。大约 10ms 后在 A 相出现下一个过零点（16）。第二个可见过零点是系统采用采集方法 1 采集的。在该点之后，开始正确的闭环无传感器运行（17）。

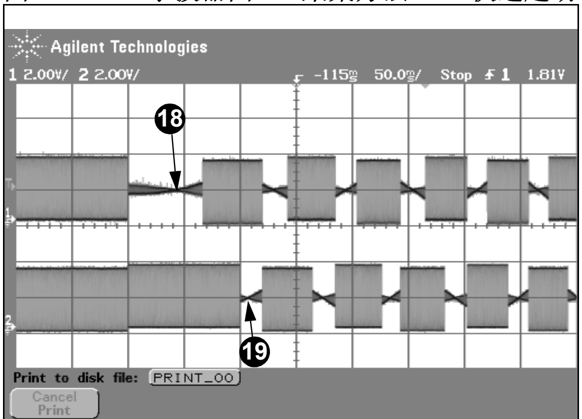
图 10： 示波器图 4：采集方法 1



对于某些电机和负载，当从转子锁定转换到开环步进时，第一个加速可能会出现过零点，并允许非常快速的起动。要利用这一点，采集点时的 BEMF 电压幅值必须足够大，而且 ZeroX Enable Speed 参数 （参数 #44）必须适当地设置得低一些。

示波器图 5（图 11）显示了在大惯性系统上实现的此类例子。在换相的前两步，转子还没有移动得很远，因此立即出现了过零点 （18， 19）。

图 11： 示波器图 5：采集方法 1 － 快速起动



运行参数

设置控制模式

本应用软件有四种控制模式供选择，用于无传感器运行。这些模式如下：

- 模式 0 －闭环电压
- 模式 1 －闭环电流
- 模式 2 －开环电压
- 模式 3 －开环电流

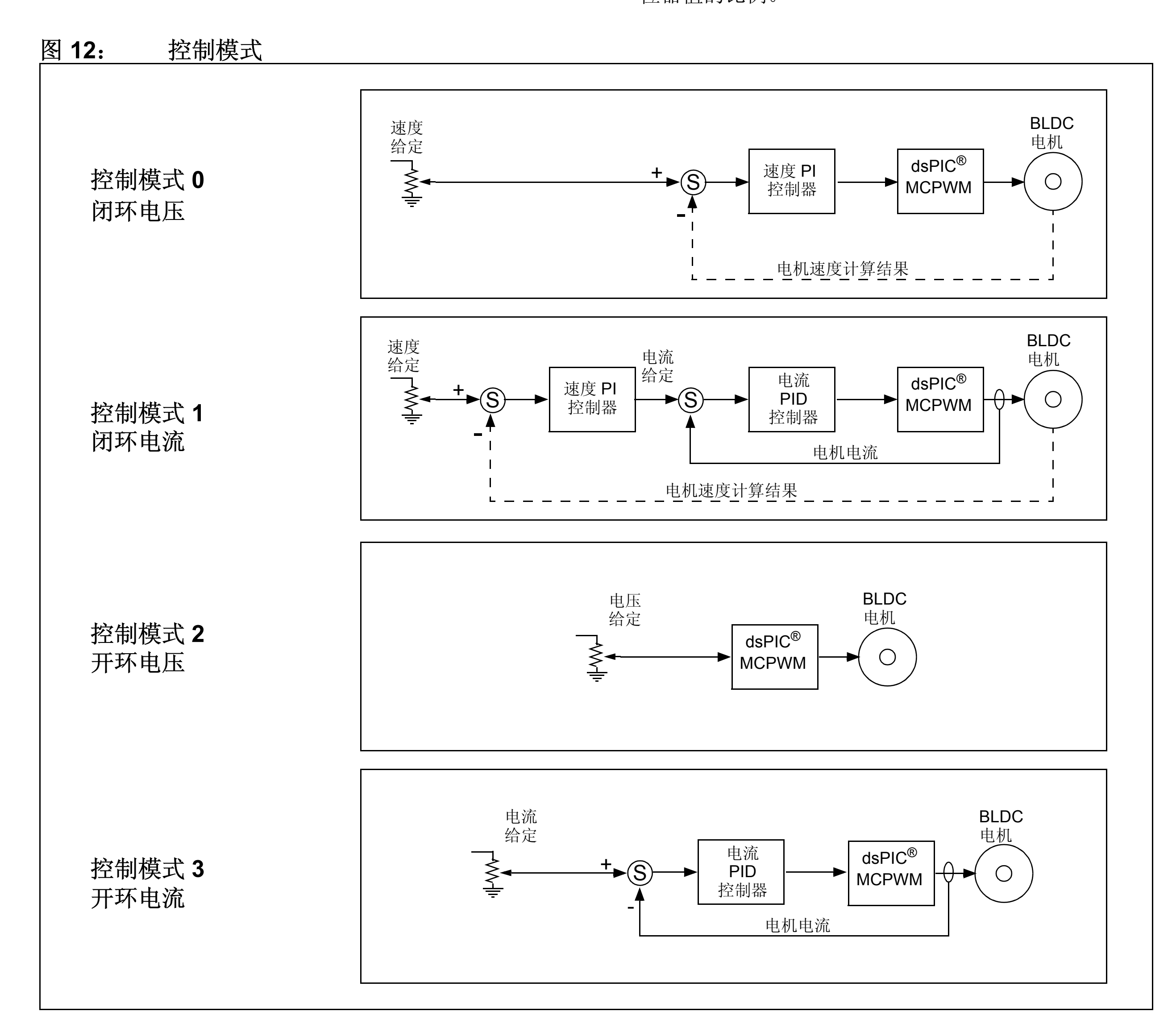
如图 12 所示，这四种软件模式决定是否使用速度控制环和电流控制环。

在模式 0 中，使用速度控制环控制发送到电机的 PWM 占空比。速度设置由电位器的值决定，可以使用 Pot X for Speed 参数（参数 #39）按比例调节电位器的值以达到所需的速度范围。

在模式 1 下，使用内部电流控制环来设置 PWM 占空比。速度控制环作为外部控制环，为内部电流控制环提供电流给定。

模式 2 不使用任何控制环来影响电机运转。这是默认的软件模式。电位器的值直接影响 PWM 占空比。选择模式 2 对特定电机进行软件初始调节可以避免控制环调节可能引起的问题，这些问题可能会影响电机起动。可以使用 Pot / for Duty 参数（参数 #37）调节此模式下的电位器值的比例。

图 12： 控制模式



模式 3 只支持电流控制环。电位器值设置电流给定。可以使用 Pot / for Current 参数 （参数 # 38）通过电位器值按比例调节电流给定。电机带有轻量负载运行在模式 3 下时，PWM 占空比通常会饱和，引起电机以最大速度运行。这是因为电机无法消耗掉电流控制器所要求的电流量引起的。使用模式 3 时，可将一个安培表串联到 DC 母线电源来观测电流控制器的效果。

控制环参数

当软件在模式 0 下运行时，需要调节 Speed P Gain 参数（参数 #20）和 Speed I Gain 参数（参数 #21）。当软件运行在模式 3 时，需要调节 Current P Gain（参数 #17）、 Current I Gain 参数 （参数 #18）和 Current D Gain 参数 （参数 #19）。如果软件运行在模式 1，电压和电流控制参数都需要调节。

必须实验性地调节 PID 参数。缺省的 PID 参数是比较保守的值，可能适合大部分电机。

设置参数限制

Stall Time Limit 参数设置延时，此参数决定在电机停转状态前软件需要等待的时间。如果软件在此时间内检测到有效的过零事件，可能会重新起动已经停转的电机。

如果电机高速运行，可能需要调节 Over Speed Limit 参数。缺省值是 3300 RPM。

Over Volts Limit 参数以十分之一伏特增量设置最大 DC 母线电压。此参数决定放电斩波电路何时开始调整 DC 母线电压。

Over Current Limit 参数以十分之一安培增量设置 DC 母线电流峰值。你可能希望将此参数设置为高出典型稳态运行电流值的数倍。

Tolerance Check 参数决定系统对换相周期变化的灵敏度，单位是百分比。如果两个过零点事件之间的时间超过了之前 Tolerance Check 百分比定义的时间，则无传感器算法将进入失调状态。电机的迅速加速或减速可能会导致超出 Tolerance Check 参数。因此，应该避免将此参数设置为较低的值。将 Tolerance Check 参数设置为 99% 将有效禁止容差检查。

Rotation Timeout 参数决定在起动程序锁定转子并开始开环加速过程之前应用程序需要等待的时间。当起动电机时，会应用转动超时。因为在起动程序开始时，电机可能已经在转动，所以转动超时是很有用的。如果电机的转速已经可以产生一个足够大的起动反电动势，则采集算法可以确定电机的位置并在超过转动超时延迟之前转换到无传感器模式。

故障排除指南

本表列出了部分异常的现象，并提供其可能原因的说明。

以大写字母 （例如 OVER CURRENT）显示的现象指 LCD 上显示的错误消息。

如需了解引用参数的信息，请参阅**附录 A：“用户参数”**。

表 4： 现象和原因

现象	可能原因
电机不通电	• 电机输出接线端不在正确的端子上。 • 电源模块供电未打开或交换了电线 （仅对于 DC 电源模块）。
初始锁定非常不稳定。	• 起动给定太高。
锁定后，电机无法开始步进。	• 初始锁定序列未成功。 • 加速开始速度 （参数 #6）太高。 • 加速开始给定 （参数 #8）太低。
起动期间转子松开锁定或振荡	• 给定不足。 • 加速开始速度 （参数 #6）太高。 • 加速率太高。加速结束速度 （参数 #7）太高和 / 或加速时间 （参数 #10）太短。
系统在采用采集方法 1 时没有在加速期间采集－FAILED TO START 或 STALLED 故障	• BEMF 不足，无法采集－增加加速结束速度 （参数 #7）或修改电压反馈比例 （参数 28 和 29）。 • 未正确调节开始加速参数，过零点不可见。 • 加速开始速度 （参数 #6）造成转动振荡。 • 功率模块或控制板未修改或修改错误。 • 检查 S2 是否位于模拟位置。
系统在采用采集方法 2 时没有在加速后无传感器运行－FAILED TO START 或 STALLED 故障	• BEMF 不足，无法起动－增加加速结束速度 （参数 #7）或修改电压反馈比例电阻。 • 采样阈值 （参数 #34）设置太高。 • 开始加速引起转动振荡。 • 功率模块或控制板未修改或错误修改。 • 检查 S2 是否位于模拟位置。
SENSORLESS LOST	• 增大容错检查 （参数 #10） • 确保输入引线没有穿过控制板。 • 如果使用速度控制运行，检查速度环是否稳定或是否发生速度超调过大情况。 • 如果使用电流控制运行，检查电流控制环是否稳定。 • 检查是否使能了自动重新采集。这在迅速加速 / 减速时尤其重要。
OVER CURRENT	• 如果使用电压控制，降低给定。 • 如果使用电流控制，检查电流环是否稳定。 • 检查电机接线。 • 检查 S2 是否位于模拟位置以及反馈信号接线是否正确。如果在系统第一次运行时 S2 的位置不正确，则必须重新复位 dsPIC 器件，因为在初始化期间要从母线电流信号读取偏置值。
OVER VOLTAGE	• 检查电压给定参数是否正确并且外部制动电阻是否已连接 （如有必要）。 • 检查电压反馈比例调节参数。 • 检查输入电源电压。
HARDWARE TRIP	• 如果电源模块显示 SHUNT OVERCURRENT 或 HALL OVERCURRENT LED，降低给定值，检查控制环是否稳定或检查比例调节反馈参数。 • 如果过压，检查电压给定 （参数 #22）是否正确，以及外部制动电阻是否已连接 （如有必要）。 • 检查输入电源电压。 • 如果过热，降低电机电流或在功率模块散热片上使用风扇。

参考读物

- *Modern Power Electronics and AC Drives*, B. Bose， Prentice Hall PTR， ISBN 0130167436
- *Electric Motors and Drives*， A.Hughes, Heinemann Newnes， ISBN 0750617411
- *Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives*，T. Miller, Oxford Clarendon，ISBN 0198593694
- K. Iizuka et. al, “Microcomputer control for sensorless brushless motor”， IEEE Transactions on Industrial Applications， Vol. 21, No.4 1985， pp 595-601

附录 A： 用户参数

下表解释了本应用笔记所述的 dcPIC30F 无传感器 BLDC 电机控制应用程序中所用到的参数。许多描述包括有相关提示，可为在具体的应用中使用这些参数提供帮助。

参数名称与 parameters.h 文件中和 LCD 所显示文本字符串中的名称一致（如 “Lock Pos.2 Dem.” 和 “CONTROL MODE”）。

表 A-1： 用户参数

参数编号	参数名称	描述	缺省值
0	DIRECTION DEMAND	决定旋转方向	FORWARD
1	CONTROL MODE	决定速度控制方法： 0 －闭环速度控制，速度环输出直接控制 PWM 占空比。 1 －闭环速度控制，速度环输出作为电流环给定。 2 －开环速度控制，通过电位器调节的电压给定直接控制 PWM 占空比。 3 －开环速度控制，通过电位器调节的电流给定。 给定值由电位器 VR2 提供。	3
2	Lock Pos.1 Time	第一次开始锁定的时间，以 10 ms 为增量	100
3	Lock Pos.1 Time	第二次开始锁定的时间，以 10 ms 为增量	100
4	Lock Pos.1 Dem.	第一次开始锁定的百分比给定	44
5	Lock Pos.1 Dem.	第二次开始锁定的百分比给定	44
6	Ramp Start Speed	开始加速时的速度值 （RPM）	20
7	Ramp End Speed	结束加速时的速度值 （RPM）	250
8	Ramp Start Dem.	开始加速的给定百分比 %	49
9	Ramp Start Dem.	结束加速的给定百分比 %	50
10	Ramp Duration	加速过程持续时间，增量为 10ms	200
11	Phase Adv.Start	相位超前的开始速度，单位为 RPM 提示：适当的相位超前可以提高系统效率，并且能扩展无传感器控制有效的速度范围。 提示：要禁止相位超前，可以把此参数的值设为高于超速翻转值。	1500
12	Phase Adv.Slope	相位超前的斜率，单位为每 1000 RPM 的度数。 例如，如果此值为 10，表明相位超前斜率为 10°/1000 RPM。	25
13	Stall Time Limit	静止等待的时间限制，单位为 10 ms。	100
14	Over Speed Limit	超速翻转值，单位为 RPM	3300
15	Over Volts Limit	过电压翻转值，增量为 0.1V。	500
16	Over Current Lim	过电流翻转值，增量为 0.1 A。	100
17	Current P Gain	电流环 PID 增益。这些增益可以按比例扩大，最高为 512 倍，因此可以采用分数表示 （例如， 256 ＝ ½）。 在控制模式 1 或 3 下需要调整这些增益。	900
18	Current I Gain		100
19	Current D Gain		0
20	Speed P Gain	速度环 PI 增益。这些增益最高可以按比例扩大，最高为 16384 倍，因此可以采用分数表示 （例如， 8192 ＝ ½）。 在控制模式 0 和 1 下需要调整这些增益。	1000
21	Speed I Gain		10
22	Voltage Demand	放电斩波器的电压给定。 提示：要禁止放电斩波器，可以把此参数的值设为高于过电压翻转值。	490

表 **A-1**： 用户参数 （续）

参数编号	参数名称	描述	缺省值
23	Volts P Gain	放电斩波器 PI 增益。注意到这些增益最高可以扩大 512 倍，因此可以采用分数表示 （例如， 256 = ½）。	10000
24	Volts I Gain		10
25	No. Motor Poles	电机转子的极数，不是极对数。因此，极数应该是偶数。这个参数影响所显示 RPM 值的速度比例。	10
26	Current Scale X	这些参数指定电压和电流反馈信号的数学比例，取决于硬件电阻分压器的比值。关于如何设置这些值，请参阅 parameters.h 文件。	100†
27	Current Scale /		539†
28	Volts Scale X		100*
29	Voltage Scale /		1305*
30	Tolerance Check	在系统失速以前过零点时间标记的变化百分比。不能把该值设为低于 10%。要禁止容差检查，将该值设为 99%。如果需要快速加速 / 减速，就要增加该值。	50
31	Auto Re-acquire	如果使能，这个参数将使系统在失速状态下自动重新采集。	1
32	Blanking Count	在换相后禁止过零检测的 PWM 周期数。在算法开始寻找过零点之前，这个延时为非驱动相中电流的放电提供了时间。	1
33	Zero X Level Thd	用于软件在采样上升沿翻转之前，所需要高于或低于 ½ VDC 的 VPH 采样数。这个参数能在识别到有效的过零点之前，通过让软件检测高于或低于 ½ VDC 参考点的最小采样数，从而使过零检测算法更稳定。	2
34	Acquire Threshld	在采集位置时用于上升沿检测的 AD 值。该值如果为 10，则表示阈值电压是 50 mV。 本参数值较低时，能在较低 BEMF 电压 （速度）下采集，但由于噪声和失调电压的影响系统可能不可靠。	10
35	Acquire Level Td	在确定相电压高于采集阈值之前，必须小于采集阈值的相电压采样数。因为 AD 转换器对三相电压进行连续循环采样，此参数的最小值为 3。	6
36	Rotation Timeout	系统必须能识别到转动的时间，以使系统能自动采集和开始无传感器运行，而不是锁定和加速，增量为 10 ms。设置的时间较长，如果有足够的 BEMF，电机能以较低的速度立即起动。如果设置的时间太长，可能会导致起动失败。	5
37	Pot / for Duty	当 CONTROL MODE = 2 时，这个参数将电位器 AD 读数 （0-1023）按比例调节为装入 PWM 发生器的占空比值。对于大多数应用，这个值应该保留为 1，提供整个 PWM 范围。	1
38	Pot / for Current	当 CONTROL MODE = 3 时，这个参数将电位器 AD 读数 （0-1023）按比例调节为电流给定值，单位为 AD 转换器计数。	8
39	Pot X for Speed	当 CONTROL MODE = 0 或 1 时，这个参数将电位器 AD 读数 （0-1023）按比例调节为速度给定值，以 RPM 为单位。	3

表 **A-1**： 用户参数 （续）

参数编号	参数名称	描述	缺省值
40	Starting Control	当这个参数设置为 1 时，使用电压控制起动。当设置为 0 时，使用电流控制起动。	1
41	Windmilling Dem.	这个参数适用于起动期间检测到风力旋转的情况 （此时，转子运转方向与给定方向相反）。它设定用于将电机减速至静止状态的电流给定值。	20
42	Braking Ramp T	这个参数设置风力旋转时电机速度减为零所耗费的时间，增量为 10 ms。	200
43	Acquire Method	当此参数设置为 0 时，采用采集方法 1 起动。此参数设置为 1 时，采用采集方法 2 起动。	1
44	ZeroX Enable Speed	采用采集方法 1 起动时，这个参数设置使能过零检测时的开环步进速度。	100

† 这些参数适用于低电压功率模块。

* 这些值假设使用低电压功率模块，其中 LK11 和 LK12 开路。

附录 B： 源代码清单

可以从 Microchip 网站 （www.microchip.com）下载最新版本的软件。源代码附于电子版的应用笔记之后。在编写本应用笔记时，最新的软件版本是 V3.01。

附录 C：程序流程图

图 C-1：主程序

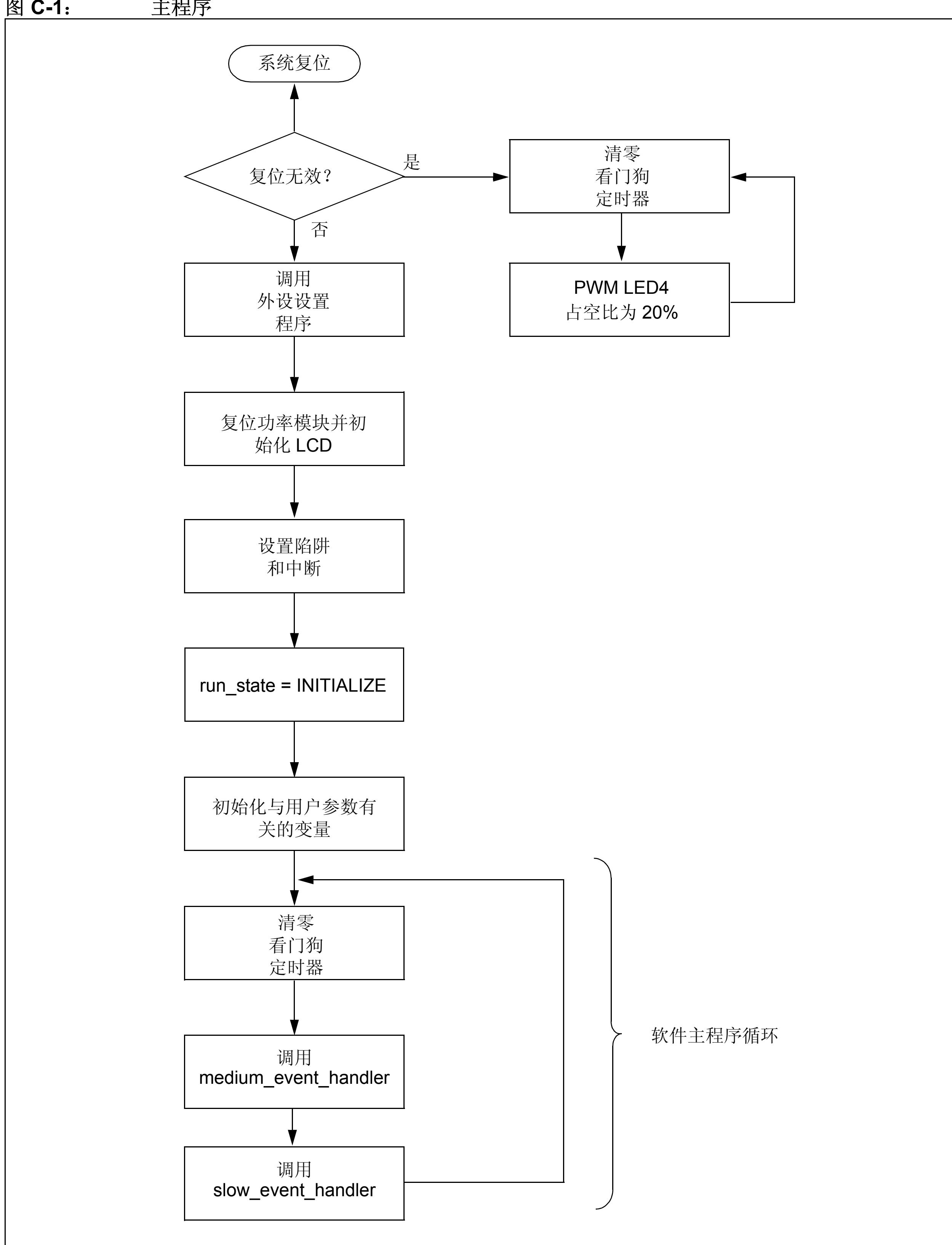


图 **C-2**： 中等事件处理程序

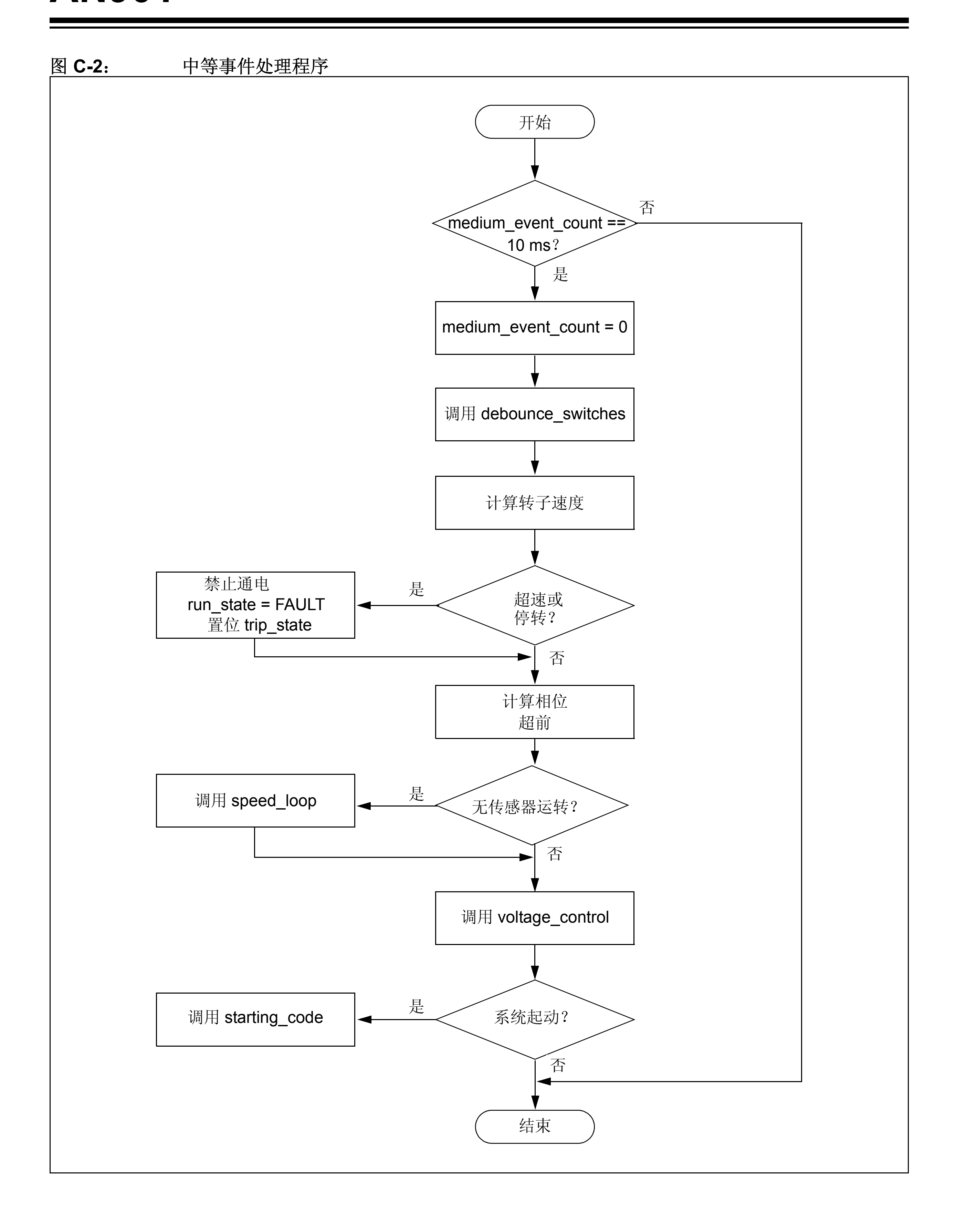


图 C-3： 起动代码

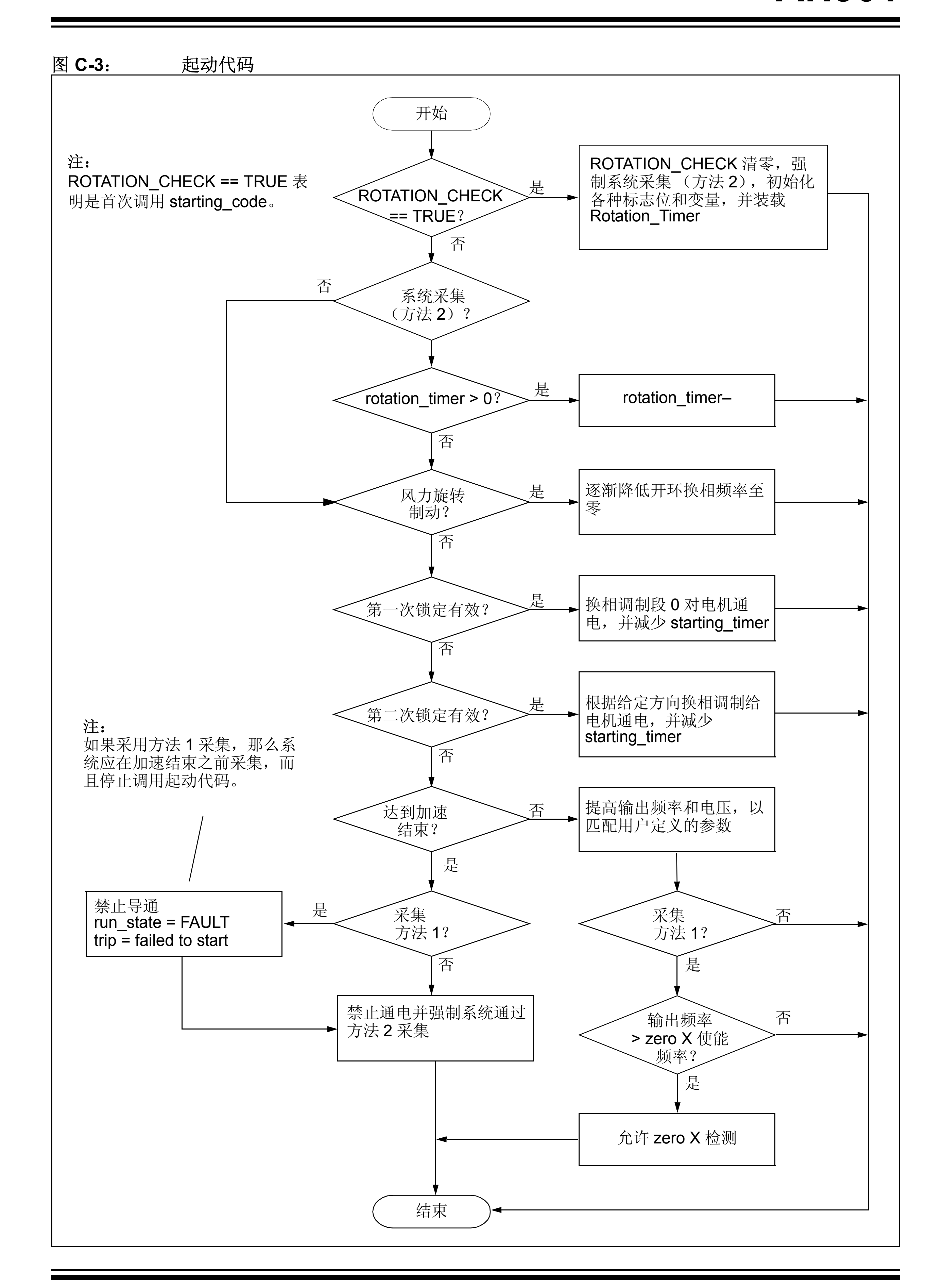

开始
注：
ROTATION_CHECK == TRUE 表明是首次调用 starting_code。
ROTATION_CHECK == TRUE？
是
ROTATION_CHECK 清零，强制系统采集（方法 2），初始化各种标志位和变量，并装载 Rotation_Timer
否
否
系统采集（方法 2）？
rotation_timer > 0？
是
rotation_timer–
否
风力旋转制动？
是
逐渐降低开环换相频率至零
否
第一次锁定有效？
是
换相调制段 0 对电机通电，并减少 starting_timer
否
第二次锁定有效？
是
根据给定方向换相调制给电机通电，并减少 starting_timer
注：
如果采用方法 1 采集，那么系统应在加速结束之前采集，而且停止调用起动代码。
否
达到加速结束？
否
提高输出频率和电压，以匹配用户定义的参数
是
禁止导通
run_state = FAULT
trip = failed to start
是
采集方法 1？
采集方法 1？
否
否
是
禁止通电并强制系统通过方法 2 采集
输出频率 > zero X 使能频率？
否
是
允许 zero X 检测
结束

图 **C-4：** 慢速事件处理程序

开始

slow_event_count == 100ms？

否

是

筛选要显示的变量

调用 process_switches

调用 screen_handler

medium_event_count = 0

结束

图 **C-5：** **PWM** 中断服务程序

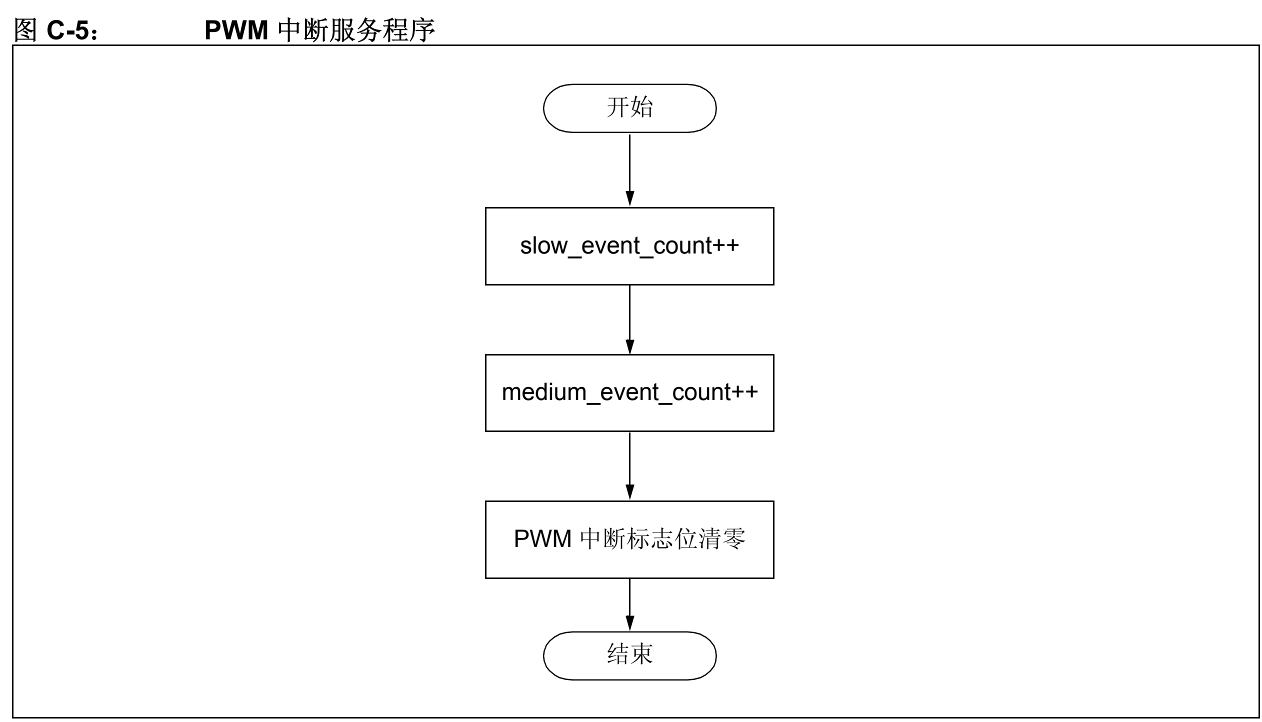


图 C-6： ADC 中断服务程序

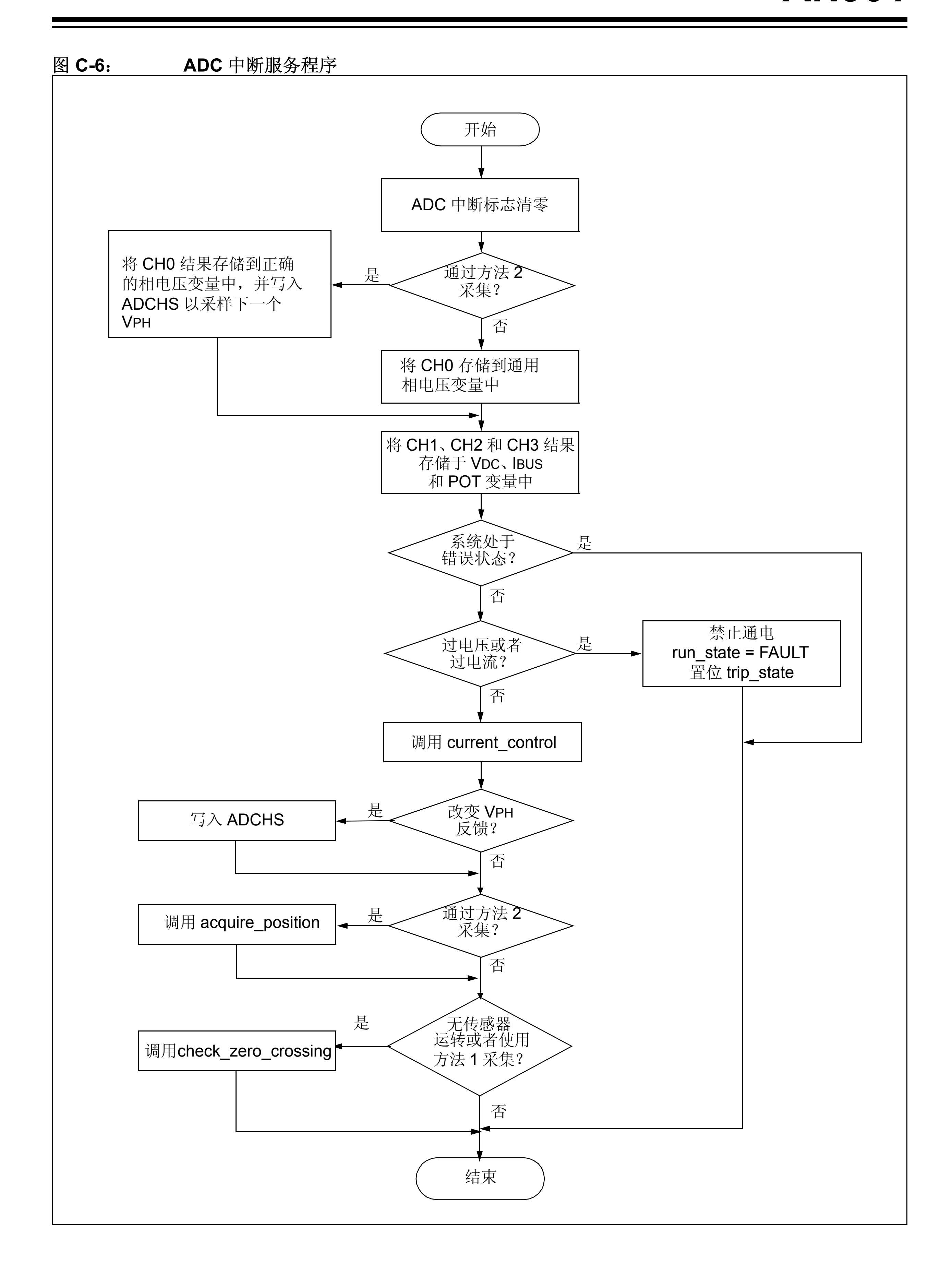


图 C-7： 采集位置 （方法 2）

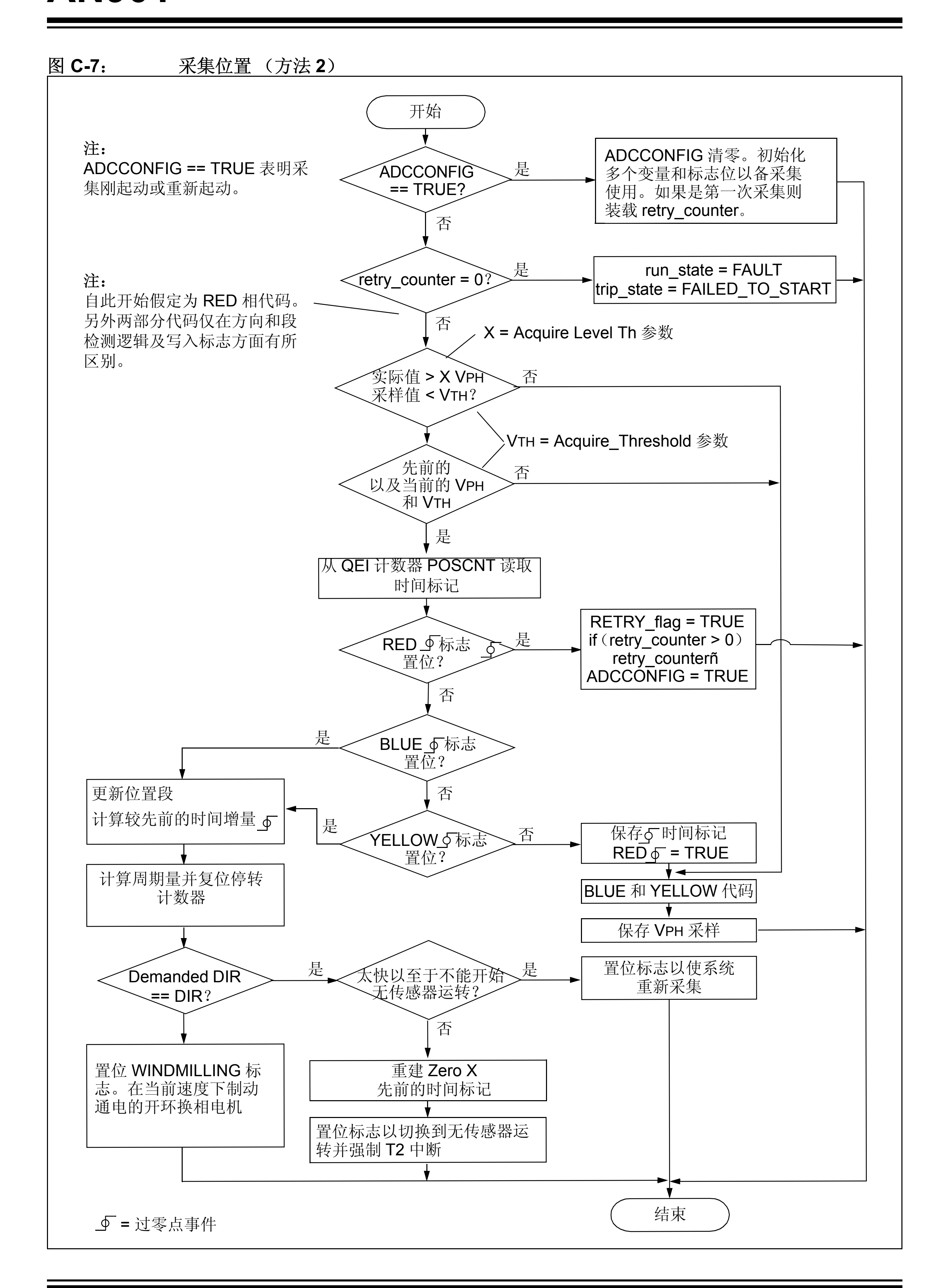

开始
注：
ADCCONFIG == TRUE 表明采集刚起动或重新起动。
ADCCONFIG == TRUE?
是
ADCCONFIG 清零。初始化多个变量和标志位以备采集使用。如果是第一次采集则装载 retry_counter。
否
注：
自此开始假定为 RED 相代码。另外两部分代码仅在方向和段检测逻辑及写入标志方面有所区别。
retry_counter = 0?
是
run_state = FAULT
trip_state = FAILED_TO_START
否
X = Acquire Level Th 参数
实际值 > X VPH
采样值 < VTH?
否
VTH = Acquire_Threshold 参数
先前的
以及当前的 VPH
和 VTH
否
是
从 QEI 计数器 POSCNT 读取时间标记
RED 标志置位?
是
RETRY_flag = TRUE
if（retry_counter > 0）
retry_counterñ
ADCCONFIG = TRUE
否
BLUE 标志置位?
是
更新位置段
计算较先前的时间增量
否
YELLOW 标志置位?
是
否
保存时间标记
RED = TRUE
BLUE 和 YELLOW 代码
保存 VPH 采样
计算周期量并复位停转计数器
Demanded DIR == DIR?
是
太快以至于不能开始无传感器运转?
是
置位标志以使系统重新采集
否
置位 WINDMILLING 标志。在当前速度下制动通电的开环换相电机
重建 Zero X
先前的时间标记
置位标志以切换到无传感器运转并强制 T2 中断
= 过零点事件
结束

图 C-8： 检测过零点

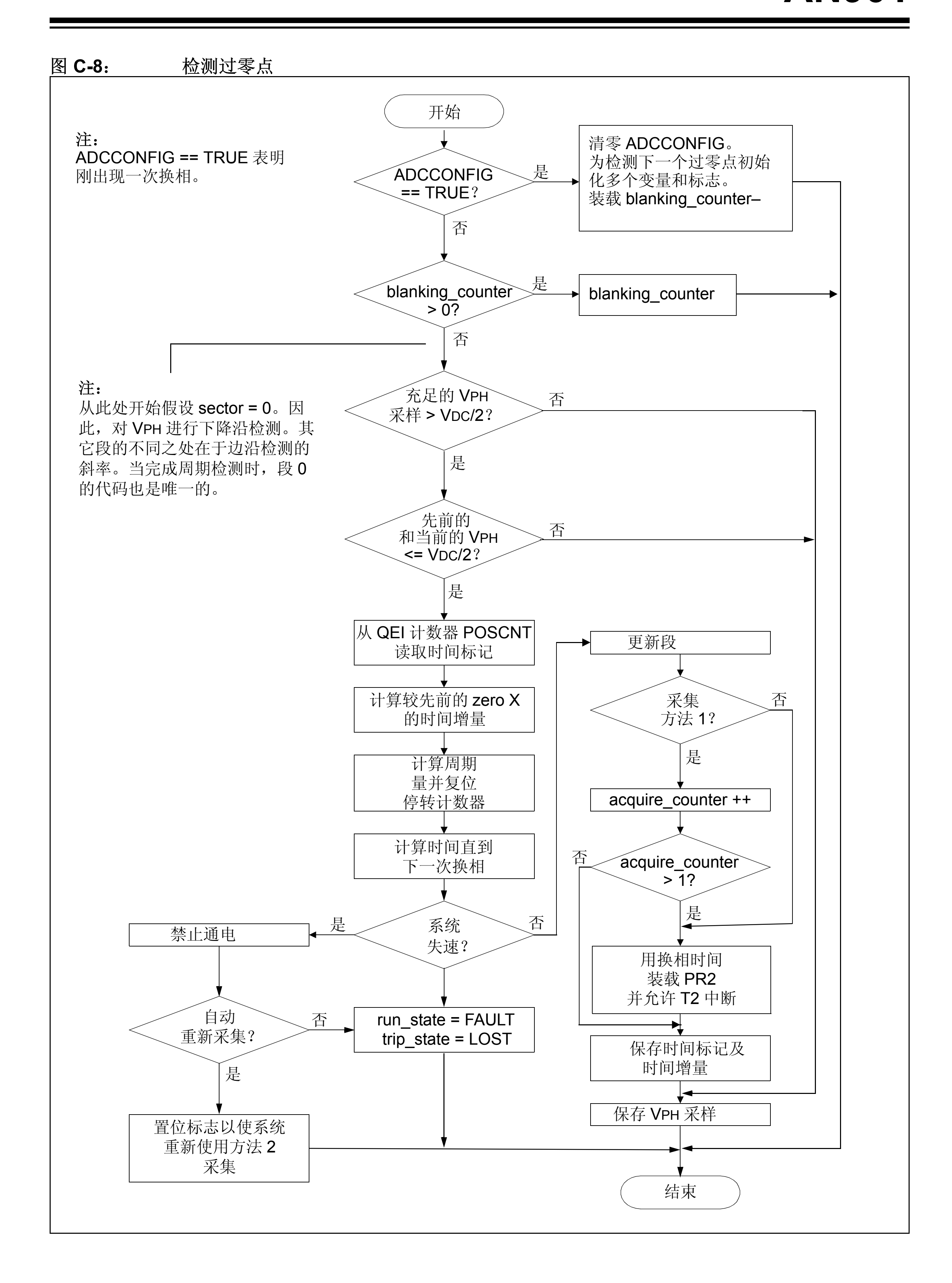
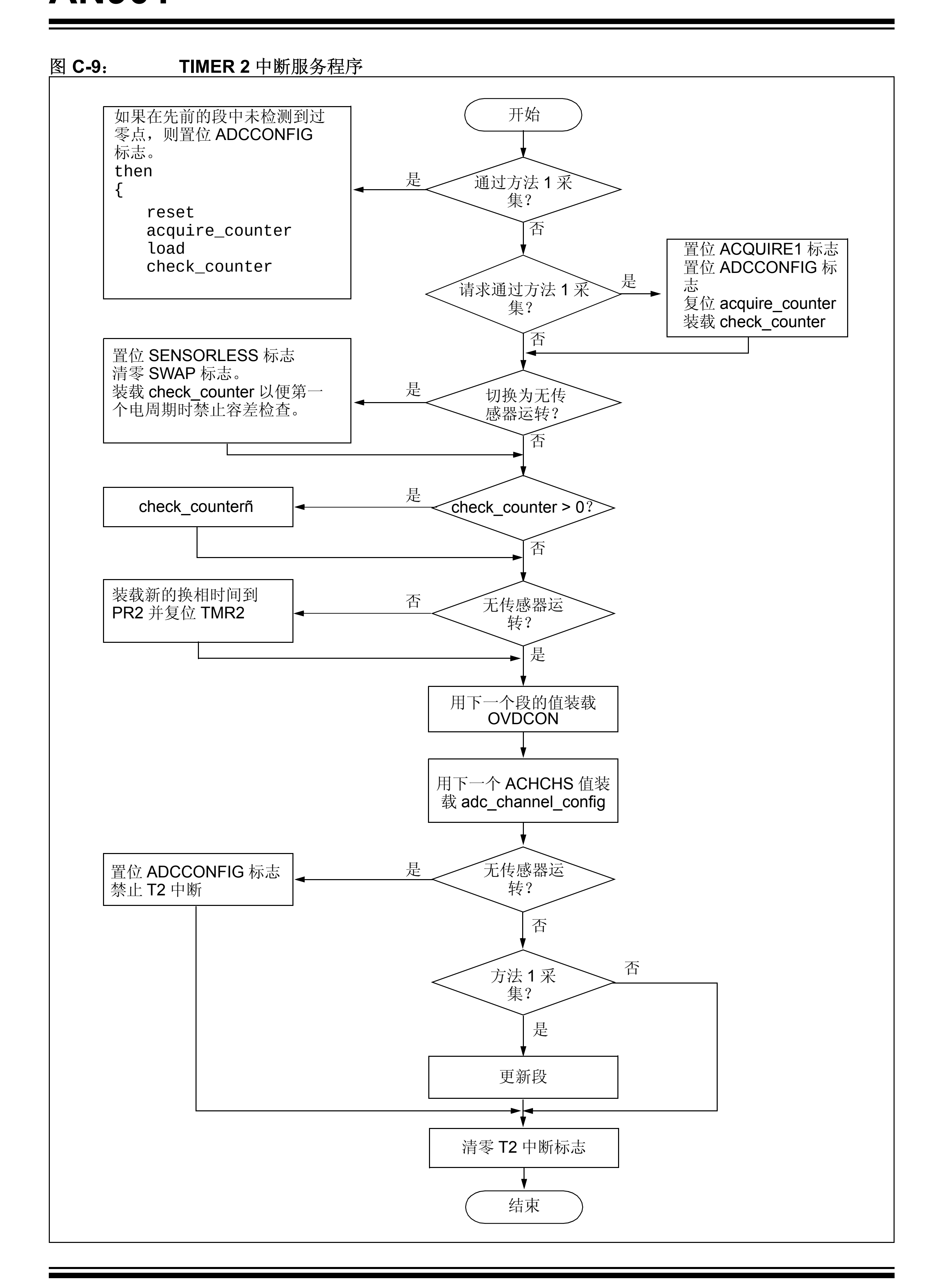

开始
注：
ADCCONFIG == TRUE 表明刚出现一次换相。
ADCCONFIG == TRUE？
是
清零 ADCCONFIG。
为检测下一个过零点初始化多个变量和标志。
装载 blanking_counter–
否
blanking_counter > 0?
是
blanking_counter
否
注：
从此处开始假设 sector = 0。因此，对 VPH 进行下降沿检测。其它段的不同之处在于边沿检测的斜率。当完成周期检测时，段 0 的代码也是唯一的。
充足的 VPH 采样 > VDC/2？
否
是
先前的和当前的 VPH <= VDC/2？
否
是
从 QEI 计数器 POSCNT 读取时间标记
计算较先前的 zero X 的时间增量
计算周期量并复位停转计数器
计算时间直到下一次换相
系统失速？
是
否
禁止通电
自动重新采集？
否
是
run_state = FAULT
trip_state = LOST
置位标志以使系统重新使用方法 2 采集
更新段
采集方法 1？
否
是
acquire_counter ++
acquire_counter > 1?
否
是
用换相时间装载 PR2 并允许 T2 中断
保存时间标记及时间增量
保存 VPH 采样
结束

图 **C-9：** **TIMER 2** 中断服务程序



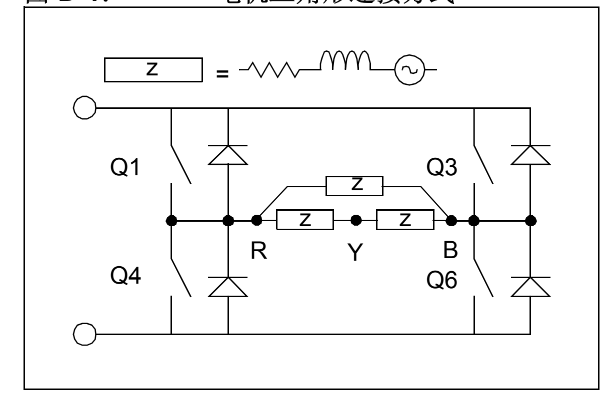
附录 D： 三角形连接电机

在 Y 形连接的三相电路中，三相电流的和必须始终等于零，对电压则没有限制。三角形连接电路正好与此相反，三相电压的和必须为零，对电流则没有限制。如果在三角形连接电路中电压不平衡，则三角形内会有电流流通，使得绕组上会有多余的压降。这将引起额外的电阻损耗，显然应该避免。对于电机来说，任何流通电流都将导致生成额外的制动转矩，引起额外的电阻损耗。流通电流的幅值取决于电压不平衡的幅度和相绕组的阻抗。

对于 BLDC 电机，限制相矢量不平衡会直接影响三角形连接电机 BEMF 波形的形状。这是因为任何“3n”（其中 n = 1，2，3……）次谐波都将是同相的，累加起来导致电压不平衡。假设梯形波形本身包含实际的三次谐波，显然三角形连接的 BLDC 通常不会有梯形 BEMF。只有在非常小的电机中，因为每相阻抗非常高，限制了流通电流的大小及由此产生的损耗，这种情况才不会发生。假定不是这种情况，则可以假设三角形连接 BLDC 的 BEMF 波形为正弦曲线。虽然使用常规 BLDC 通电仍可运转，但是转矩脉动将会增加。

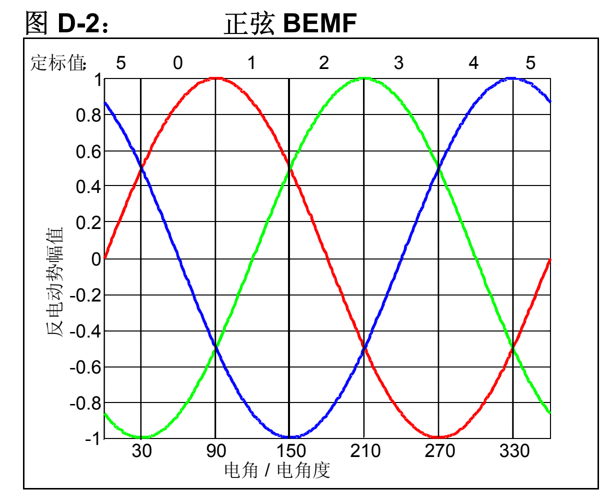
了解了以上内容后，接下来我们将考虑三角形连接电机对过零 BEMF 算法的影响。对于三角形连接方式，所有三相中都有电流流动，但任一时刻仅有两相被驱动。如图 D-1 所示，其中 R 相和 B 相输出由逆变器驱动。

图 D-1： 电机三角形连接方式



如果 BEMF RY 为正，BEMF YB 为负，且 Q1/Q6 导通，这就相当于前面给出的标准 Y 型连接换相图中的段 1。等价的正弦 BEMF 图如下所示。

图 D-2： 正弦 BEMF



请记住三个 BEMF 电压和始终等于零，在一段的中间，不通电端的测量电压将是 ½ VDC。这是因为在这段的这点上，其中一个 BEMF 为零，其他两个则数量相等而方向相反。这与 Y 型连接电机正好相同。此外，此点对应于换相到下一个通电模式的正确点。

总之，尽管在 BEMF 波形和相导通方式上存在实质的差别，但是在不修改代码的情况下，三角形连接电机应该可以正常运行。

附录 E： PID 控制器背景知识

全面讨论比例积分微分（PID）控制器超出了本文范围，这一部分将尝试提供一些有关调节控制器的指导信息。

PID 控制器响应闭合控制环中的差值信号，并尝试调节控制量，来实现期望的系统响应。被控参数可以是任何可测量的系统量，例如速度、电压、电流或股价。 PID 控制器的输出可以控制一个或多个将影响受控系统量的系统参数。例如，此应用中的速度控制环可以直接控制 PWM 占空比，也可以设置内部控制环的电流给定，来调节电机电流。PID 控制器的好处是可以通过调整一个或多个增益值并观察系统响应的变化，凭经验进行调节。

数字 PID 控制器以周期性采样间隔执行，假设控制器的执行频率足够高，足以正确地控制系统。例如，因为电机电流变化非常迅速，所以本应用中的电流控制器会每个 PWM 周期执行一次。由于机械时间常数的原因，电机速度变化相对较慢，所以此应用中的速度控制器以中等事件速率 （100 Hz）执行。

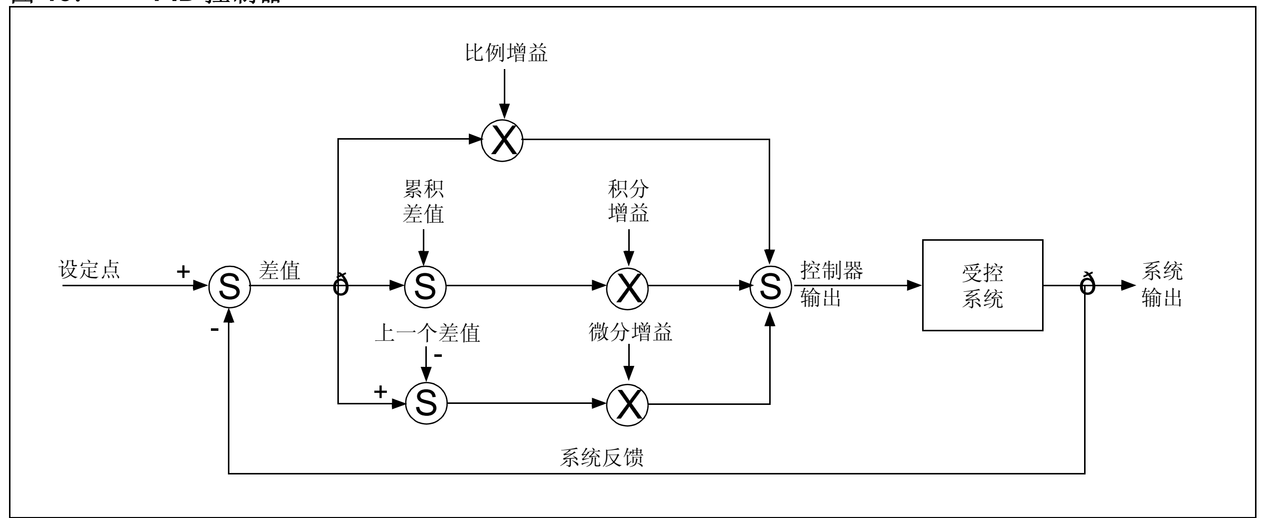
图 13 是 PID 算法的框图。用被控参数的实际测量值减去该参数的期望设置值就得到差值信号。差值的符号表示控制输入所要求的变化方向。差值信号乘以 P 增益，就得到控制器的比例（P）项 。这将导致 PID 控制器产生一个控制响应，该响应是差值幅度的一个函数。随着差值信号的增大，控制器的 P 项也增大，以提供更多的修正。

P 项的效果通常是随时间的推移减小总误差。但是，当错误趋向零时，P项的影响也将减弱。在大部分系统中，受控参数的差值将变得非常接近零，但不会等于零。结果会得到一个较小的剩余稳态误差。控制器的积分（I）项用于修正较小的稳态误差。 I 项获取连续累积的差值信号总和。这样，一段时间后小稳态误差会累积成为较大的差值。此累积差值信号乘以一个 I 增益因子，就得到 PID 控制器的 I 输出项。

PID 控制器的微分 （D）项用于提高控制器的速度并响应差值信号的变化率。D 项输入是从前一个差值减去当前差值得到的。此增量差值乘以一个 D 增益因子，就得到 PID 控制器的 D 输出项。系统误差变化越快，控制器 D 项产生的控制输出也就越大。

应该注意的是，不是所有的 PID 控制器都会实现 D 项，还有些控制器甚至不会实现 I 项。例如，因为电机速度变化的响应时间非常慢，本应用中的速度控制器就没有 D 项。在这种情况下， D 项可能会造成 PWM 占空比变化过多，这可能影响无传感器算法的执行并产生过电流翻转。

图 13： PID 控制器



E.1 调节 PID 增益

PID 控制器的 P 增益将设置整个系统的响应。在第一次调节控制器时， I 增益和 D 增益都应该设置为零。然后可以增加 P 增益，直到系统能够很好地响应设定点的变化，且没有出现过多的过冲或振荡。使用较低的 P 增益值会较“松”地控制系统，而较高的值则会较“紧”地控制系统。目前，系统可能不会达到设定点。

在选定了合理的 P 增益之后，可以缓慢增加 I 增益使系统误差值为零。大多数系统都只要求少量的 I 增益。注意 I 增益所造成的影响，它如果足够大，就会抵消 P 项的作用、减缓整体控制响应，并使系统在设定点附近振荡。如果出现这种现象，减少 I 增益并增加 P 增益通常可以解决问题。

在设置好 P 和 I 增益以后，就可以设置 D 增益了。D 项可以加速控制改变的响应，但是应当谨慎使用，因为它会使控制器输出发生非常快速的变化。这种现象称为“设定点跳变” 。当控制设定点改变时系统误差的差分瞬间变得非常大，就会出现设定点跳变。在某些情况下，会损坏系统硬件。如果 D 增益设置为零时系统响应可以接受，就可以忽略 D 项。

注：

请注意以下有关 Microchip 器件代码保护功能的要点：

- Microchip 的产品均达到 Microchip 数据手册中所述的技术指标。
- Microchip 确信：在正常使用的情况下， Microchip 系列产品是当今市场上同类产品中最安全的产品之一。
- 目前，仍存在着恶意、甚至是非法破坏代码保护功能的行为。就我们所知，所有这些行为都不是以 Microchip 数据手册中规定的操作规范来使用 Microchip 产品的。这样做的人极可能侵犯了知识产权。
- Microchip 愿与那些注重代码完整性的客户合作。
- Microchip 或任何其它半导体厂商均无法保证其代码的安全性。代码保护并不意味着我们保证产品是 "牢不可破"的。

代码保护功能处于持续发展中。 Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。任何试图破坏 Microchip 代码保护功能的行为均可视为违反了《数字器件千年版权法案（Digital Millennium Copyright Act）》。如果这种行为导致他人在未经授权的情况下，能访问您的软件或其它受版权保护的成果，您有权依据该法案提起诉讼，从而制止这种行为。

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM
CERTIFIED BY DNV
== ISO/TS 16949:2002 ==

Microchip 位于美国亚利桑那州Chandler 和Tempe 及位于加利福尼亚州 Mountain View 的全球总部、设计中心和晶圆生产厂均于2003 年10 月通过了 ISO/TS-16949:2002 质量体系认证。公司在 PICmicro® 8 位单片机、 KEELOQ® 跳码器件、串行 EEPROM、单片机外设、非易失性存储器和模拟产品方面的质量体系流程均符合 ISO/TS-16949:2002。此外，Microchip 在开发系统的设计和生产方面的质量体系也已通过了 ISO 9001:2000 认证。



全球销售及服务网点

美洲

公司总部 Corporate Office
2355 West Chandler Blvd.
Chandler, AZ 85224-6199
Tel: 1- 480-792-7200
Fax: 1- 480-792-7277
Technical Support: 1-480-792-7627
Web Address:www.microchip.com

亚特兰大 Atlanta
3780 Mansell Road, Suite 130
Alpharetta, GA 30022
Tel: 1-770-640-0034
Fax: 1-770-640-0307

波士顿 Boston
2 Lan Drive, Suite 120
Westford, MA 01886
Tel: 1-978-692-3848
Fax: 1-978-692-3821

芝加哥 Chicago
333 Pierce Road, Suite 180
Itasca, IL 60143
Tel: 1-630-285-0071
Fax: 1-630-285-0075

达拉斯 Dallas
16200 Addison Road, Suite 255
Addison Plaza
Addison, TX 75001
Tel: 1-972-818-7423
Fax: 1-972-818-2924

底特律 Detroit
Tri-Atria Office Building
32255 Northwestern Highway, Suite 190
Farmington Hills, MI 48334
Tel: 1-248-538-2250
Fax: 1-248-538-2260

科科莫 Kokomo
2767 S. Albright Road
Kokomo, IN 46902
Tel: 1-765-864-8360
Fax: 1-765-864-8387

洛杉矶 Los Angeles
25950 Acero St., Suite 200
Mission Viejo, CA 92691
Tel: 949-462-9523
Fax: 949-462-9608

圣何塞 San Jose
1300 Terra Bella Avenue
Mountain View, CA 94043
Tel: 1-650-215-1444
Fax: 1-650-961-0286

加拿大多伦多 Toronto
6285 Northam Drive, Suite 108
Mississauga, Ontario L4V 1X5, Canada
Tel: 1-905-673-0699
Fax: 1-905-673-6509

亚太地区

澳大利亚 Australia
Microchip Technology Australia Pty Ltd
Unit 32, 41 Rawson Street
Epping 2121, NSW
Sydney, Australia
Tel: 61-2-9868-6733 Fax: 61-2-9868-6755

中国 – 北京
北京市朝阳门北大街 6 号
北海万泰大厦 706B 室
邮编：100027
电话：86-10-85282100 传真：86-10-85282104

中国 – 成都
成都市提督街 88 号
四川建行大厦 2401-2402 室
邮编：610016
电话：86-28-86766200 传真：86-28-86766599

中国 – 福州
福州市五四路 71 号
国贸广场 28 层 F 单元
邮编：350001
电话：86-591-7503506
传真：86-591-7503521

中国 – 香港特别行政区
香港新界葵芳兴芳路 223 号
新都会广场 2 座 901-906 室
电话：852-24011200
传真：852-24013431

中国 – 上海
上海市仙霞路 317 号
远东国际广场 B 栋 701 室
邮编：200051
电话：86-21-62755700
传真：86-21-62755060

中国 – 深圳
深圳市福田区滨河大道 5022 号
联合广场 A 座 1812 室
邮编：518033
电话：86-755-82901380
传真：86-755-82951393

中国 – 顺德
佛山市顺德区容桂镇凤祥南路 2 号
宏建大厦 401 室
邮编：528303
电话 86-757-28395507 传真 86-757-28395571

中国 – 青岛
青岛市香港中路 12 号
丰合广场 B505A 室
邮编：266071
电话 86-532-5027355 传真 86-532-5027205

台湾地区
Kaohsiung Branch
30F - 1 No. 8
Min Chuan 2nd Road
Kaohsiung 806, Taiwan
Tel: 886-7-536-4816 Fax: 886-7-536-4817

台湾地区
Taiwan Branch
11F-3, No. 207
Tung Hua North Road
Taipei, 105, Taiwan
Tel: 886-2-2717-7175 Fax: 886-2-2545-0139

台湾地区
Taiwan Branch
13F-3, No. 295, Sec. 2, Kung Fu Road
Hsinchu City 300, Taiwan
Tel: 886-3-572-9526 Fax: 886-3-572-6459

印度 India
Divyasree Chambers
1 Floor, Wing A (A3/A4)
No. 11, O'Shaugnessey Road
Bangalore, 560 025, India
Tel: 91-80-22290061 Fax: 91-80-22290062

日本 Japan
Yusen Shin Yokohama Building 10F
3-17-2, Shin Yokohama, Kohoku-ku,
Yokohama, Kanagawa, 222-0033, Japan
Tel: 81-45-471- 6166 Fax: 81-45-471-6122

韩国 Korea
168-1, Youngbo Bldg. 3 Floor
Samsung-Dong, Kangnam-Ku
Seoul, Korea 135-882
Tel: 82-2-554-7200
Fax: 82-2-558-5932 或 82-2-558-5934

新加坡 Singapore
200 Middle Road
#07-02 Prime Centre
Singapore, 188980
Tel: 65-6334-8870 Fax: 65-6334-8850

欧洲

奥地利 Austria
Durisolstrasse 2
A-4600 Wels
Austria
Tel: 43-7242-2244-399
Fax: 43-7242-2244-393

丹麦 Denmark
Regus Business Centre
Lautrup hoj 1-3
Ballerup DK-2750 Denmark
Tel: 45-4420-9895 Fax: 45-4420-9910

法国 France
Parc d'Activite du Moulin de Massy
43 Rue du Saule Trapu
Batiment A - ler Etage
91300 Massy, France
Tel: 33-1-69-53-63-20
Fax: 33-1-69-30-90-79

德国 Germany
Steinheilstrasse 10
D-85737 Ismaning, Germany
Tel: 49-89-627-144-0
Fax: 49-89-627-144-44

意大利 Italy
Via Salvatore Quasimodo, 12
20025 Legnano (MI)
Milan, Italy
Tel: 39-0331-742611 Fax: 39-0331-466781

荷兰 Netherlands
Waegenburghtplein 4
NL-5152 JR, Drunen, Netherlands
Tel: 31-416-690399 Fax: 31-416-690340

英国 United Kingdom
505 Eskdale Road
Winnersh Triangle
Wokingham
Berkshire, England RG41 5TU
Tel: 44-118-921-5869
Fax: 44-118-921-5820

07/12/04